И. М. ВИННИКОВ

ТЕХНОЛОГИЯ И РАСЧЕТЫ ПРИ РЕМОНТЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



И. М. ВИННИКОВ

ТЕХНОЛОГИЯ И РАСЧЕТЫ ПРИ РЕМОНТЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1970

~~6П2.1.081~~
~~В 48~~
~~УДК~~ 621.313.3.~~004.67~~

Винников И. М.

В 48 Технология и расчеты при ремонте двигателей переменного тока, М., «Энергия», 1970.

224 с. с илл.

В книге рассматриваются основные элементы теории, материалы и конструкции обмоток трехфазных машин переменного тока. Исследуются обмотки различных видов на основании звезды пазовых э. д. с. Специальный раздел посвящен несимметричным двухслойным обмоткам и методу уменьшения несимметрии. Описаны методы расчета и пересчета машин, применяемые при ремонте.

Описаны технологические процессы ремонта электродвигателей, а также изготовление обмоток.

Книга предназначена в качестве пособия для повышения квалификации обмотчиков, мастеров и бригадиров специализированных ремонтных предприятий и электроремонтных цехов, а также может быть использована широким кругом работников, занимающихся ремонтом электрических машин.

3-3-10
97-70

6П2.1.081

Исахар Моисеевич Винников

Технология и расчеты при ремонте двигателей переменного тока

Редакторы *Р. Б. Уманцев, И. П. Березина*
Переплет художника *В. И. Карпова*
Технический редактор *В. В. Зеркаленкова*
Корректор *И. А. Володяева*

Сдано в набор 5/V 1970 г. Подписано к печати 10/XII 1970 г. Т-18716
Формат 84×108¹/₃₂ Бумага типографская № 1
Усл. печ. л. 11,76 Уч.-изд. л. 12,05
Тираж 16 000 экз. Цена 75 коп. Зак. 1229

Издательство „Энергия". Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР.
Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

С каждым годом увеличивается количество установленных электродвигателей в промышленности, сельском хозяйстве и строительстве. Наличие в работе большого количества двигателей вызывает необходимость организации их ремонта.

Наряду с централизованным ремонтом, производимым специализированными организациями по единой технологии, имеются многочисленные электроремонтные цеха, мелкие мастерские, которые занимаются восстановлением вышедшего из строя оборудования непосредственно на предприятии. В последнем случае нередко имеют место серьезные нарушения технологии ремонта, в то время как к качеству ремонта сейчас предъявляются повышенные требования.

Большое значение имеют также вопросы модернизации электродвигателей с целью приспособления их к новым условиям работы.

В данной книге обмотки различных видов исследуются на основании звезды пазовых э. д. с. Это дает возможность достаточно полно определять различные свойства обмоток и схем соединения.

Если в какой-то степени данная книга поможет решить перечисленные выше вопросы, то автор будет считать свою задачу выполненной.

Автор выражает благодарность Р. Б. Уманцеву за ценные указания по редактированию книги.

Замечания, отзывы и пожелания просьба направлять по адресу: Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10, издательство «Энергия».

Автор

Глава первая

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРЕХФАЗНЫХ ОБМОТКАХ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Если проводник в виде витка или катушки подключить к источнику электрического тока, то проходящий по катушке ток создаст магнитное поле. Направление магнитных силовых линий в зависимости от направления тока в проводниках определяется правилом буравчика. Из рис. 1-1 видно, что магнитное поле катушки (катушка условно показана одним витком) образует два полюса: северный N, откуда выходят силовые линии, и южный S, куда входят магнитные силовые линии.

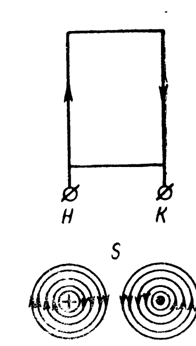


Рис. 1-1. Магнитное поле катушки.

Катушка имеет два выводных конца: начало *н* и конец *к*.

Условно за начало витка можно принять тот из двух свободных выводов проводника, который лежит слева, а за конец — лежащий справа.

Согласное соединение катушек. Если соединить катушки так, чтобы направление тока в них было одинаковым, например, по часовой стрелке (рис. 1-2), то магнитное поле, образованное током этих катушек, создаст столько пар полюсов, сколько катушек соединено. В данном случае получим две пары полюсов или четыре полюса[1].

---

[1] Следует учитывать, что в электрических машинах катушки размещаются по окружности статора и поэтому **проводники *г* и *а* располагаются рядом.**

Из рис. 1-2 видно, что на участке *а — б* магнитные силовые линии, складываясь, образуют северный полюс N, а на участке *б — в* — южный полюс S, на участке *в — г* — северный полюс N и на участке *г — а* — южный полюс S.

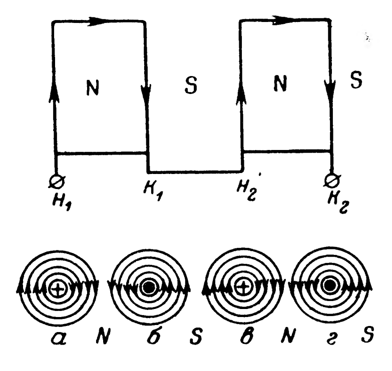


Рис. 1-2. Магнитное поле двух катушек, соединенных «согласно».

Такое соединение катушек назовем «согласным». Для осуществления согласного соединения катушек следует конец $к_1$ первой катушки соединить с началом $н_2$ второй катушки.

Встречное соединение катушек. Если соединить две катушки так, чтобы направление тока в них было противоположным друг другу (рис. 1-3), то магнитное поле, образованное током этих катушек, создаст не четыре полюса, а два.

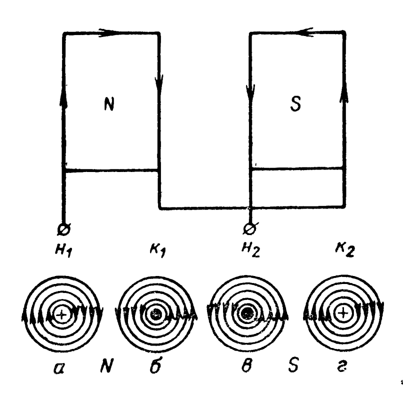


Рис. 1-3. Магнитное поле двух катушек, соединенных «встречно».

На участке *а — б* (рис. 1-3) магнитные силовые линии складываются и образуют северный полюс N. На участке *б — в* магнитные силовые линии направлены встречно и не образуют полюса. На участке *в — г* они опять складываются и образуют южный полюс S. В этом случае мы получим не четыре полюса, как при согласном соединении, а только два. Такое соединение катушек мы будем в дальнейшем называть «встречным». Из рис. 1-3 видно, что для встречного соединения катушек необходимо соединить конец первой катушки с концом второй. В зависимости от характера схемы обмотки и ее конструкции они могут быть соединены согласно или встречно.

По первому принципу соединяются простые концентрические однослойные катушечные обмотки и шаблонные обмотки.

По второму - концентрические однослойные обмотки «вразвалку», цепные обмотки «вразвалку», шаблонные обмотки «вразвалку», а также двухслойные обмотки. Комбинация этих двух принципов используется для двухскоростных двигателей.

Прежде чем перейти к изучению трехфазных обмоток машин переменного тока, введем несколько понятий, связанных с их выполнением, а также укажем требования, предъявляемые к ним.

1) Число полюсов $2\,p$ может быть только четным, а число пар полюсов p может быть любым.

Число полюсов определяется по следующей формуле:

$$2p = \frac{2 \cdot 60f}{n_c}; \quad 2p = \frac{2 \cdot 60 \cdot 50}{n_c} = \frac{6\,000}{n_c}, \tag{1-1}$$

где p — число пар полюсов; f — частота переменного тока, *гц* (здесь и далее будем рассматривать только промышленную частоту $f=50$ *гц*); n_c — синхронная скорость вращения, *об/мин*.

2) Полюсное деление τ — это часть длины окружности расточки статора, приходящейся на один полюс (рис. 1-9,*а*). Так как диаметр расточки равен $D_в$, а длина окружности $\pi D_в$, то полюсное деление равно:

$$\tau = \frac{\pi D_в}{2p}, \text{ см.} \tag{1-2}$$

3) Шаг по пазам витка (секции) машин переменного тока — y выражается числом зубцов, лежащих между сторонами витка, при выполнении обмотки:

с диаметральным шагом, шаг по пазам y_0 соответствует полюсному делению; если выразить полюсное деление числом пазов, расположенных на длине τ, то можно написать $y_0=\tau$;

с укороченным шагом шаг по пазам y меньше полюсного деления τ

$$y < \tau;$$

с удлиненным шагом шаг по пазам y больше полюсного деления

$$y > \tau.$$

Как правило, в простых, однослойных, концентрических обмотках шаги катушек выбирают таким образом, чтобы средний шаг был равен диаметральному.

В двухслойных, а также в шаблонных и цепных обмотках применяют укороченный шаг, равный 0,75—0,85τ. В двухполюсных двигателях степень укорочения достигает 0,6—0,5τ из-за технологических соображений. Укорочение шага приводит к экономии меди и улучшению формы кривой э. д. с.

Обмотка с удлиненным шагом не применяется, однако в двухскоростных двигателях шаг по пазам получается удлиненным по отношению к диаметральному шагу для меньшей скорости и укороченным для большей скорости.

4) Соотношение между электрическими и геометрическими градусами. Трехфазная обмотка в простейшем случае представляет собой совокупность трех однофазных обмоток, катушечные группы которых смещены друг относительно друга на 120 *эл. град*. Каждая фаза в общей сложности занимает $^1/_3$ периферии статора, т. е. 120 геометрических градусов.

Полюсному делению τ соответствуют 180 *эл. град*. В двухполюсном двигателе, имеющем 3 000 *об/мин*, электрические градусы совпадают с геометрическими, так как один оборот ротора двигателя соответствует с одной стороны двум полюсным делениям 2τ (360 *эл. град*), а с другой стороны 360° (геометрическим градусам).

Двигатель с номинальной синхронной скоростью вращения 1 500 *об/мин* согласно равенству (1-1) имеет четыре полюса. В этом случае один оборот ротора (360 геометрических градусов) соответствует 4τ или 720 *эл. град*. Отсюда для четырехполюсного двигателя можно вывести следующее равенство: 360° = =720 *эл. град*.=2 360 *эл. град*. Так как в четырехполюсном двигателе $p=2$, то $360° = p \cdot 360$ *эл. град* или $1° = p$, *эл. град*, где p — число пар полюсов. Это соотношение справедливо для любого числа полюсов.

5) Фазные зоны трехфазной обмотки. Как было выяснено ранее, на каждую пару полюсов (при согласном соединении) приходится одна катушечная группа. Следовательно, трехфазный двигатель, имеющий одну пару полюсов (3 000 *об/мин*), выполняется тремя катушечными группами (рис. 1-4). Каждая катушечная группа

имеет две стороны, расположенные друг от друга на расстоянии полюсного деления τ.

Следовательно, три катушечные группы занимают шесть сторон. Участок, на котором располагается одна сторона катушечной группы, называется фазной зоной. Каждая фазная зона занимает 360/6=60 *эл. град*.

Если на каждом из этих участков расположены стороны катушек, принадлежащих только одной фазе, то такие обмотки называют обмотками со сплошными фазными зонами и выполняются они только с диаметральным шагом.

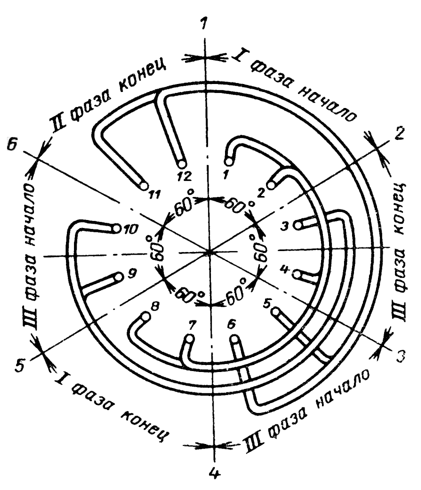


Рис. 1-4. Расположение и чередование фазных зон обмотки. $2p=2$.

Если на каждом из этих участков располагаются стороны катушек разных фаз, то такие обмотки называются обмотками с несплошными фазными зонами и выполняются с укороченными или удлиненным шагом.

Однослойные концентрические обмотки выполняются со сплошными фазными зонами.

б) Чередование фазных зон (фаз) трехфазного двигателя (генератора) лучше всего можно проследить на двигателе, имеющем одну пару полюсов, так как в этом случае число электрических градусов совпадает с числом геометрических.

Каждая фазная зона занимает 60 *эл. град*. Так как в двигателе с одной парой полюсов число электрических градусов равно числу геометрических, то для определения чередования фазных зон (фаз) нужно окружность разделить на шесть (по числу фазных зон) равных частей (рис. 1-4). Из рисунка видно, что если на участке *1—2* расположить начало первой фазы C_1, то конец этой фазы C_4 должен быть расположен на расстоянии полюсного деления τ, т. е. на расстоянии 180° (шаг диаметральный), на участке *4—5*. Начало второй фазы C_2 должно быть сдвинуто по отношению к первой на рас-

стояние $\frac{2}{3}\tau$ или на 120 *эл. град*, что соответствует участку *3—4*, а конец второй фазы C_5 соответственно расположится на участке *6—1*.

Рассуждая таким же образом, устанавливаем, что начало третьей фазы C_3 будет находиться на участке

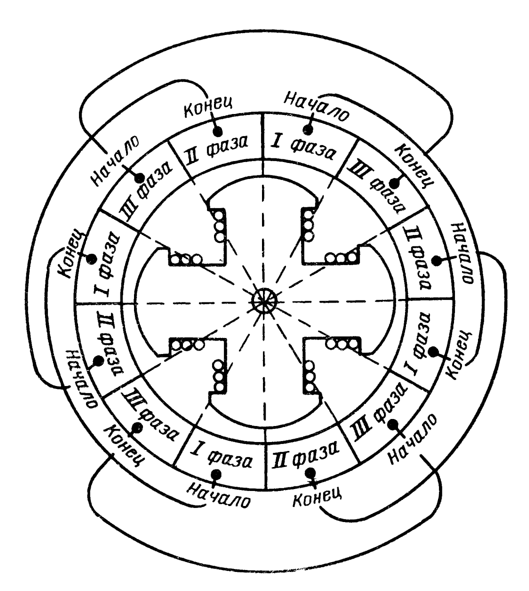


Рис. 1-5. Расположение и чередование фазных зон обмотки. $2p=4$.

5—6, а конец C_6 соответственно на участке *2—3*. Таким образом, сдвиг между началами и концами разных фаз равен $\frac{2}{3}\tau$ или 120 *эл. град*, отсюда можно установить следующее чередование фаз: начало фазы C_1, конец фазы C_6, начало фазы C_2, конец фазы C_4, начало фазы C_3, конец фазы C_5. Такая последовательность фазных зон справедлива для всех типов трехфазных обмоток независимо от числа полюсов и конструктивного их выполнения. На рис. 1-5 дано расположение фазных зон четырехполюсной машины. Каждая фазная зона занимает 30 геометрических градусов, что соответствует для четырехполюсной машины 60 *эл. град*.

Начало и концы фаз можно определить и следующим способом. Полюсное деление τ соответствует 180 *эл. град*, на нем располагается одна из сторон катушечных групп всех трех фаз, каждая из которых занимает q пазов. Следовательно, q пазов каждой фазы соответствует $180/3=60$ *эл. град*. Поэтому начала фаз следует брать на расстоянии $2q$ друг от друга. Концы фаз также располагаются на расстоянии $2q$ друг от друга.

Пример. Число пазов $z=36$, число полюсов $2p=4$. Определим, из каких пазов выведены начала и концы фаз:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{36}{4\cdot 3}=3.$$

Начало первой фазы C_1 возьмем из 5-го паза. Тогда начало второй фазы C_2 будет в 11-м пазу $(5+2q=5+2\cdot 3=11)$, а третья фаза C_3 выходит из 17-го паза $(11+2q=11+2\cdot 3=17)$.

Общие требования, предъявляемые к трехфазным обмоткам электрических машин:

а) обмотка должна создавать трехфазное вращающееся магнитное поле;

б) кривая э. д. с. должна быть возможно ближе к синусоиде, для чего при малом q следует применять обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу, а также укорочение шага;

в) в каждой фазе обмотки статора должны индуктироваться одинаковые э. д. с. требуемой величины, сдвинутые между собой по фазе на 120 и 240 *эл. град*.

г) обмотка должна иметь практически одинаковое общее сопротивление по фазам;

д) обмотка должна быть рассчитана на прохождение тока определенной величины, обеспечивающей нормальную плотность тока, допустимый нагрев, зависящий от класса изоляции;

е) обмотка должна иметь надежную витковую и корпусную изоляцию, а также достаточную механическую прочность, выдерживающую механические напряжения. Лобовые части должны иметь форму, обеспечивающую хорошую вентиляцию.

1-2. ЭЛЕМЕНТЫ ОБМОТОК СТАТОРОВ И РОТОРОВ

Эффективный виток и эффективный проводник. Основным элементом обмотки является эффективный виток. Эффективным витком называется контур, обра-

зованный двумя активными проводниками, расположенными под разноименными полюсами (рис. 1-6) на расстоянии τ или близком к нему.

Активный или эффективный проводник, а также эффективный виток технологически может быть изготов-

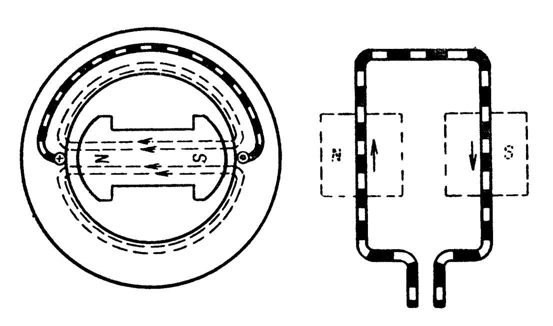


Рис. 1-6. Направление э. д. с. в витке.

лен из одного или нескольких параллельных проводов, называемых также элементарными. Тогда число активных проводов в пазу равно:

$$w_{п.ак} = \frac{w_{п.эл}}{a_1},$$

где $w_{п.эл}$ — число элементарных проводников в пазу; a_1 — число элементарных проводников в одном активном (эффективном) проводнике.

При выполнении различных расчетов удобно пользоваться числом условных эффективных проводников на паз $w_{п.эф}$, которое определяется по следующей формуле:

$$w_{п.эф} = \frac{w_{п.эл}}{a_1 a_2}, \quad (1\text{-}3)$$

где a_2 — число параллельных ветвей в схеме обмотки.

Далее в тексте величину $w_{п.эф}$ будем называть числом эффективных проводников на паз.

Таким образом, если в схеме обмотки нет параллельных ветвей, т. е. все катушечные группы в фазе соединены последовательно, то $a_2 = 1$ и

$$w_{п.эф} = w_{п.ак}.$$

Сечение активного проводника равно:

$$q_{п.ак} = q_п a_1, \ мм^2,$$

где $q_п$ — сечение элементарного проводника.

Тогда по аналогии с определением величины $w_{п.эф}$ условное (расчетное) сечение эффективного проводника, т. е. сечение, по которому проходит полный ток фазы,

$$q_{эф} = q_{п} a_1 a_2, \text{ мм}^2. \quad (1\text{-}4)$$

При последовательной схеме обмотки, при $a_2 = 1$

$$q_{эф} = q_{ак}.$$

Пример. Активный проводник состоит из четырех параллельных (элементарных) проводников сечением 10 *мм*² каждый. Всего в пазу находится три активных проводника. В схеме обмотки осуществлено соединение в две параллельные ветви.

Определить расчетное число эффективных проводников на паз и сечение эффективного проводника:

$$w_{п.эл} = w_{п.ак} a_1 = 3 \cdot 4 = 12;$$

$$w_{п.эф} = \frac{w_{п.эл}}{a_1 a_2} = \frac{12}{4 \cdot 2} = 1\frac{1}{2};$$

$$q_{эф} = q_{п} a_1 a_2 = 10 \cdot 4 \cdot 2 = 80 \text{ мм}^2.$$

Как видно, из примера, условное (расчетное) число эффективных проводников на паз может быть дробным и в общем случае не равно реальному числу активных проводников, находящихся в пазу.

Катушечная группа обмоток машин переменного тока образуется путем последовательного соединения определенного количества рядом лежащих катушек (рис. 1-7,*б*, *в*). Исключением являются цепные обмотки,

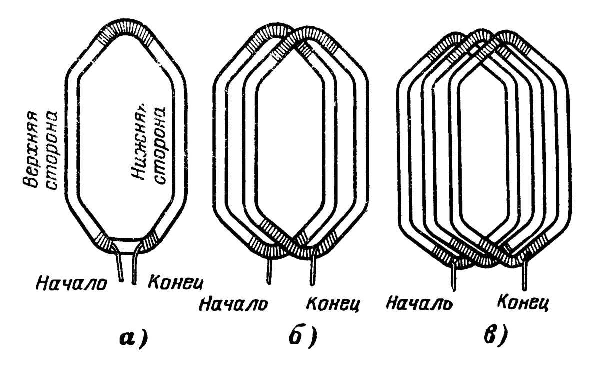


Рис. 1-7. Элементы обмотки.

а — катушка; *б* — катушечная группа $q=2$; *в* — то же $q=3$.

которые рассмотрены отдельно. В зависимости от количества катушечных групп и способа их соединения в фазах меняется число полюсов, а следовально, и скорость вращения машины.

Число последовательно соединенных катушек q в катушечной группе определяется из следующего соотношения:

$$q = \frac{z}{2pm}, \qquad (1\text{-}5)$$

где z — число пазов; $2p$ — число полюсов; m — число фаз.

Из соотношения (1-5) видно, что q равно числу пазов, приходящихся на один полюс и фазу.

Пример.

$$z = 36,\ 2p = 4,\ m = 3,$$

тогда

$$q = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3.$$

В примере число пазов, приходящихся на один полюс и фазу, равно трем, или катушечная группа состоит из трех последовательно соединенных катушек. Если q равно целому числу, все катушечные группы обмотки будут иметь одинаковое число катушек, равное q. Кроме того, все катушечные группы фазы будут симметрично расположены относительно осей полюсов, следовательно, наведенные в них э. д. с. будут равны по абсолютной величине и по фазе. Это дает возможность включить катушечные группы в фазе последовательно и параллельно. При некоторых типах обмоток число пазов на полюс и фазу получается дробным.

Пример.

При $z = 30,\ 2p = 4,\ m = 3$

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{30}{3 \cdot 4} = 2\frac{1}{2}.$$

Так как образовать катушечную группу из двух с половиной последовательно соединенных катушек нельзя, поступают следующим образом. В одну катушечную группу включают три катушки, а во вторую две. В этом случае число последовательно соединенных катушек не равно числу пазов на полюс и фазу. Дробное число

пазов на полюс и фазу в общем виде выражается следующей формулой:

$$q = b + \frac{c}{d} = \frac{bd + c}{d}, \qquad (1\text{-}6)$$

где c, d и b являются целыми числами, причем c/d представляет собой правильную дробь с простыми числами.

Дробное число пазов на полюс и фазу можно реализовать, если часть катушечных групп, состоящих из b последовательно соединенных катушек соединить с другим типом катушечных групп, состоящих из $b+1$ последовательно соединенных катушек.

В дальнейшем условно будем называть катушечную группу, состоящую из большого числа последовательно соединенных катушек, «большой», а состоящие из меньшего количества последовательно соединенных катушек — «малой» катушечной группой. Величина наведенной э. д. с. в малых и больших катушечных группах будет различной. Следовательно, такие группы в отдельности нельзя соединять параллельно.

1-3. НАВЕДЕННАЯ Э. Д. С. ЭФФЕКТИВНОГО ВИТКА

Мгновенное значение э. д. с., индуктированное в одном проводнике по закону электромагнитной индукции, определяется соотношением

$$e = B_x lv \cdot 10^{-4} \text{ в}, \qquad (1\text{-}7)$$

где e — мгновенное значение наведенной э. д. с., *в*; B_x — индукция в воздушном зазоре в том месте окружноти статора, где в данный момент находится проводник, *тл*; v — скорость проводника относительно магнитного потока, *см/сек*; l — длина проводника, *см*.

Активная длина проводника l и скорость его перемещения в магнитном поле v остаются постоянными, поэтому можно написать:

$$e = CB_x, \text{ в}. \qquad (1\text{-}8)$$

где C — некоторая постоянная величина.

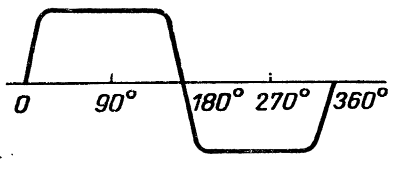


Рис. 1-8. Кривая магнитной индукции в воздушном зазоре.

Таким образом, величина э. д. с. в проводнике пропорциональна магнитной индукции в воздушном зазоре B_x и, следова-

тельно, характер изменения мгновенного значения э. д. с. совпадает с характером изменения магнитной индукции B_x.

На рис. 1-8 дана кривая изменения магнитной индукции в зазоре. Под действием магнитной индукции в проводнике *1*, лежащем под северным полюсом (рис. 1-9,*а*),

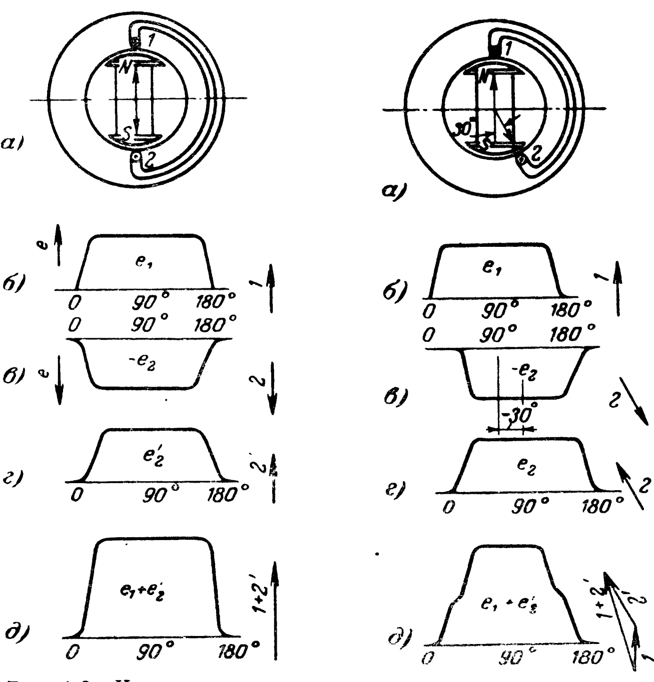


Рис. 1-9. Кривая напряжения витка $y_0=\tau$.

а — расположение сторон; *б* — кривая напряжения проводника *1*; *в* — то же проводника *2*; *г* — то же проводника *2* с обратным знаком; *д* — кривая напряжения витка.

Рис. 1-10. Кривая напряжения витка при $y<\tau$.

а — расположение сторон; *б* — кривая напряжения проводника *1*; *в* — кривая проводника *2*; *г* — то же проводника *2* с обратным знаком; *д* — кривая напряжения витка.

наводится положительная э. д. с. e_1 (рис. 1-9,*б*), а в проводнике *2* (рис. 1-9,*в*), в этот момент лежащем под южным полюсом, наводится э. д. с. e_2 с отрицательным значением.

Для определения разности потенциалов витка (э. д. с. витка) следует из потенциала проводника *1* вычесть потенциал проводника *2*, или, что то же самое,

к потенциалу проводника *1* прибавить потенциал проводника *2* с обратным знаком. Для этого кривую изменения э. д. с. в проводнике *2* (рис. 1-9,*в*) развертываем на 180° (рис. 1-9,*г*), получаем ту же кривую с положительным знаком. Для определения, э. д. с. витка складываем кривые рис. 1-9,*б* и *г*. Суммарная кривая дана на рис. 1-9,*д*. Характер изменения суммарной кривой э. д. с. витка при диаметральном шаге совпадает с характером изменения э. д. с. одного проводника. В случае укороченного шага (рис. 1-10) или удлиненного (рис. 1-11) в проводнике *1*, находящемся в данный момент под северным полюсом, наводится э. д. с., равная э. д. с. при диаметральном шаге (рис. 1-10,*б* и 1-11,*б*). В проводнике *2*, сдвинутом относительно центра южного полюса на величину ±30°, наводится э. д. с., график которой также будет сдвинут на величину ±30° (рис. 1-10,*в* и 1-11,*в*). Для определения э. д. с. витка поступаем так же, как это описано выше при диаметральном шаге. Меняем направление э. д. с. в проводниках *2* (рис. 1-10,*г* и 1-11,*г*) и складываем кривые рис. 1-10,*б* с кривыми рис. 1-10,*г*, а также кривые рис. 1-11,*в* с кривыми рис. 1-11,*г*. Суммарные кривые изменения э. д. с. витка имеют ступенчатую форму (рис. 1-10,*д* и 1-11,*д*). Эффективное значение э. д. с. витка с укороченным и удлиненным шагом меньше, чем при диаметральном шаге.

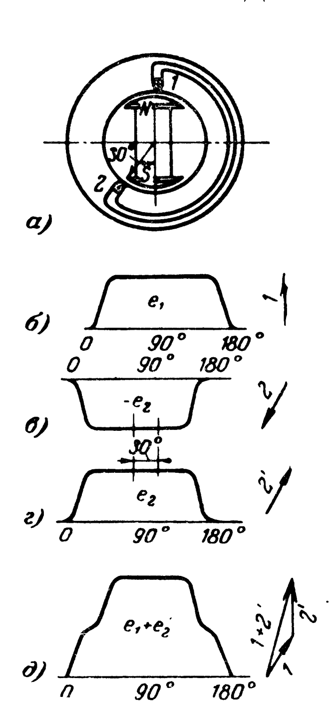


Рис. 1-11. График напряжения витка при $y > \tau$.

а — расположение сторон; *б* — кривая напряжения проводника *1*; *в* — кривая проводника *2*; *г* — то же проводника *2* с обратным знаком; *д* — кривая напряжения витка.

Укорочение шага улучшает форму кривой э. д. с., приближая ее к идеальной синусоиде, уменьшает расход меди, но уменьшает эффективное значение наведенной э. д. с.

В дальнейшем для исследования обмоток машин переменного тока вместо кривых э. д. с. по пазам будем пользоваться векторами пазов, направление которых соответствует определенному положению пазов в магнитном поле.

На рис. 1-9,*а*, 1-10,*а* и 1-11,*а* показано направление векторов, которые в определенном масштабе изображают э. д. с. пазов по величине и по направлению.

Для определения вектора э. д. с. витка необходимо из вектора э. д. с. паза *1* вычесть вектор э.д.с. паза *2* или, что то же самое, к вектору паза *1* прибавить вектор паза *2* с обратным знаком. В случае диаметрального шага э. д. с. витка равна удвоенному значению э. д. с. проводника (рис. 1-9,*д*).

В случае укороченного шага (рис. 1-10) или удлиненного (рис. 1-11) суммарный вектор э. д. с. витка будет по абсолютной величине меньше, чем при диаметральном шаге.

1-4. ЗВЕЗДА ПАЗОВЫХ Э. Д. С.

Обмотки машин переменного тока лучше всего могут быть исследованы на основе звезды пазовых э. д. с., соответствующих положению отдельных пазов в магнитном поле. На рис. 1-12 показано направление векторов э. д. с. в зависимости от расположения пазов.

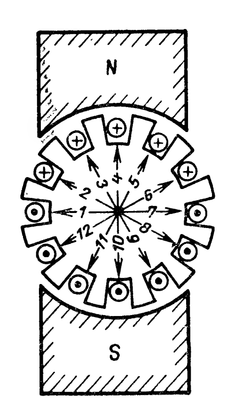


Рис. 1-12. Звезда пазовых э. д. с.

Если в каждом пазу лежит одинаковое число витков, то амплитуда пазовых э. д. с. будет одинаковой. Однако мгновенные значения э. д. с. будут разными в зависимости от того, под каким углом по отношению к центру полюса находится данный паз. Например, если паз находится в рассматриваемый момент времени под серединой полюса, то э. д. с., индуктированная в проводниках этого паза, достигает амплитуды (пазы *4* и *10* на рис. 1-12). В проводниках, лежащих в пазах *1* и *7*, э. д. с. равна нулю, так как они находятся на геометрической нейтрали. В остальных пазах в данный момент наводится э. д. с. меньше максимальной. Максимальное значение достигается в тот момент времени, когда паз повернется

на некоторый угол и расположится против центра полюса.

Если считать, что э. д. с., индуктируемая в проводниках, изменяется по закону синуса, то в этом случае э. д. с. всех пазов можно изобразить в виде векторов, равных по величине, но сдвинутых между собой на определенный угол. При этом угол сдвига

$$\alpha = \frac{\pi}{z_0} = \frac{180}{z_0} \text{ эл. град.} \quad (1\text{-}9)$$

где z_0 — число пазов машины под одним полюсом:

$$z_0 = \frac{z}{2p}. \quad (1\text{-}10)$$

Если значение $z = 2pmq$ из равенства (1-5) подставить в выражение (1-10), получим:

$$z_0 = \frac{2pmq}{2p} = mq. \quad (1\text{-}11)$$

Подставив величину z_0 из (1-11) в (1-9), получим окончательное выражение для угла между двумя векторами или пазовый угол трехфазной обмотки:

$$\alpha = \frac{180}{z_0} = \frac{180}{mq} = \frac{60}{q} \text{ эл. град.} \quad (1\text{-}12)$$

Абсолютное значение каждой пазовой э. д. с. в данный момент можно определить, если спроектировать рассматриваемый вектор на ось ординат. Из рис. 1-12 видно, что вектор *1*, находящийся на геометрической нейтрали, дает проекцию на ось ординат, равную нулю. Наоборот, вектор э. д. с. паза *4*, находящийся под серединой полюса, дает амплитудное значение.

С помощью звезды пазов можно легко рассмотреть методы выполнения схем обмоток.

Принцип составления схем рассмотрим на следующем примере

$$z = 24;\quad 2p = 4;\quad q = \frac{z}{2pm} = \frac{24}{4\cdot 3} = 2.$$

Сдвиг фаз между соседними пазами будет равен:

$$\alpha = \frac{60}{q} = \frac{60}{2} = 30 \text{ эл. град.}$$

На рис. 1-13,*а* дано расположение пазов в развернутом виде, а также направление э. д. с. В пазах *1*, *7*, *13* и *19*, находящихся в данный момент времени на нейтрали, э. д. с. не наводится. В остальных пазах наводятся э. д. с. с направлением, указанным на рисунке стрелками. Каждой паре полюсов соответствуют 360 *эл. град*, занимаемых 12 пазами.

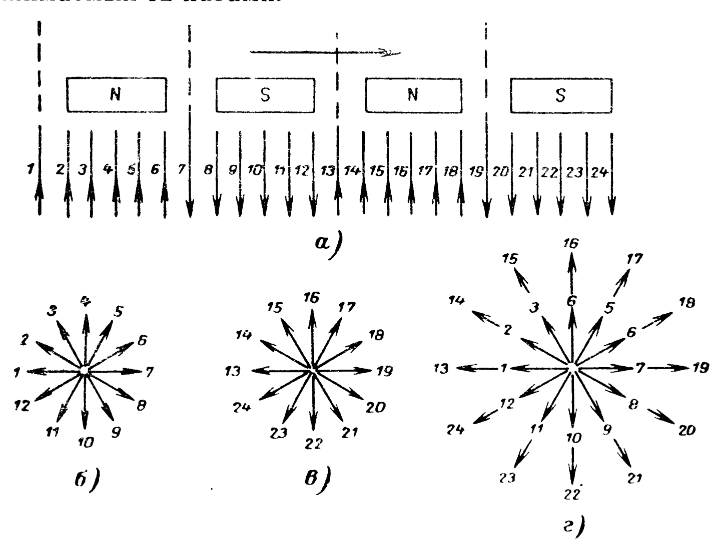


Рис. 1-13. Построение звезды векторов пазовых э. д. с. однослойной **обмотки.**

а — схема пазов в развернутом виде; *б* — звезда пазовых э. д. с. первой пары полюсов; *в* — то же второй пары полюсов; *г* — полная звезда пазовых э. д. с.

Для построения звезды пазовых э. д. с. отложим вектор э. д. с. паза *1* (рис. 1-13,*б*) в горизонтальном направлении. В рассматриваемый момент времени (рис. 1-12) он находится на нейтрали, следовательно, его проекция на вертикальную ось должна равняться нулю.

Затем по направлению часовой стрелки со сдвигом на угол 30° откладываем вектор э. д. с. паза *2*. От него в том же направлении откладываем вектор э. д. с. паза *3* и т. д.

Отложив 12 векторов э. д. с. для первых 12 пазов, получаем звезду пазовых э. д. с. для первой пары полюсов. При построении звезды пазовых э. д. с. для второй пары полюсов замечаем, что вектор паза *13* нахо-

дится в тех же магнитных условиях, что и вектор э. д. с. паза *1* (рис. 1-13,*а*). Соответственно вектор э. д. с. паза *14* совпадает с вектором э. д. с. паза *2* и т. д., таким образом, звезда пазовых э. д. с. для второй пары полюсов (рис. 1-13,*в*) полностью совпадает со звездой пазовых э. д. с. первой пары полюсов. При соединении всех катушечных групп последовательно их э. д. с. следует сложить, так как направления их совпадают и звезда пазовых э. д. с. примет вид, изображенный на рис. 1-13,*г*.

Пользуясь звездой векторов пазовых э. д. с., разберем принцип составления трехфазной однослойной обмотки. Звезда пазовых э. д. с. имеет 360 *эл. град*. Начало катушки обмотки с диаметральным шагом должно находиться на расстоянии 180 *эл. град* от ее конца. Таким образом, если в пазу *1* лежит начало какой-нибудь единичной катушки, то в пазу *7*, сдвинутом относительно паза *1* на 180 *эл. град*, лежит ее конец (рис. 1-13,*а*). Отсюда ясно, что половина векторов пазовых э. д. с. должна быть использована для начал катушек, а вторая половина векторов — для их концов. В обмотках со сплошными фазными зонами катушечная группа состоит из q последовательно соединенных катушек, уложенных в рядом лежащие пазы.

Если при $q=2$ для фазы *А* выбираем пазы *1* и *2* за начала единичных катушек, то концы их должны быть расположены в пазах *7* и *8* (сдвиг на 180 *эл. град*).

Начало фазы *В* следует образовать единичными катушками, расположенными в пазах *5* и *6*, так как они сдвинуты по отношению пазов *1* и *2* на 120 *эл. град*. Соответственно концы катушек фазы *В* первой пары полюсов должны быть расположены в пазах *11* и *12*.

Начало фазы *С* должно быть сдвинуто по отношению фазы *В* также на 120 *эл. град*.

Следовательно, начала единичных катушек фазы *С* должны лежать в пазах *9* и *10*, а концы их в пазах *3* и *4*.

Для второй пары полюсов нужно выбрать для каждой фазы те пазы, которые в звезде пазовых э. д. с. имеют те же направления, что и у первой пары полюсов. Так, для фазы *А* начала единичных катушек второй пары полюсов должны лежать в пазах *13* и *14* (рис. 1-13,*а* и 1-14), концы их в пазах *19* и *20*. На рис. 1-14,*а* дана развернутая схема обмотки, составленная на основании звезды векторов пазовых э. д. с., из

которой видно, что пазы *1* и *2* выбраны как начала единичных катушек фазы *А*. На рис. 1-14,*а* они обозначены *I—I*.

Концы катушек сдвинуты относительно их начал на 180 *эл. град* и согласно звезде векторов пазовых э. д. с.

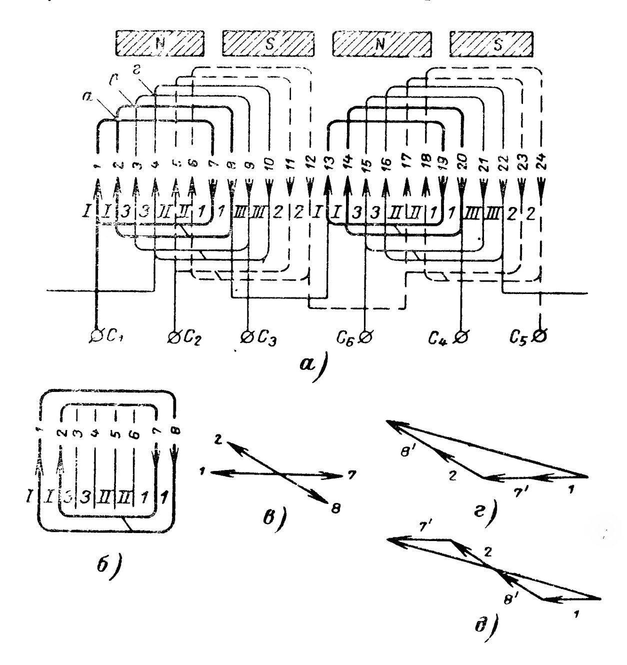


Рис. 1-14. Однослойная обмотка с одинаковым шагом.

$2p=4$; $z=24$; $y_0=\tau$.

а — схема; *б* — практическое соединение катушечной группы; *в* — звезда пазовых э. д. с. катушечной группы $q=2$; *г* — результирующее значение э. д. с. катушечной группы с одинаковым шагом; *д* — то же с разным шагом.

и схеме они расположены в пазах *7* и *8* (рис. 1-14,*а*) и обозначены *1—1*.

Соответственно начала катушек фазы *В* обозначены *II—II*, а концы *2—2*. Фазы *С III—III* и *3—3*.

Однако схема, составленная согласно звезде векторов пазовых э. д. с., имеет недостаток — большое количество пересечений катушек в лобовых частях. Катушки катушечной группы *I—I* пересекаются в двух точках *а* и *б*. Этого пересечения можно избежать, если сторону катушки, находящуюся в пазу *1*, соединить со сто-

роной катушки, лежащей в пазу *8*; соответственно сторону катушки, лежащей в пазу *2*, соединить со стороной в пазу *7* (рис. 1-14,*б*). С точки зрения величины э. д. с. и ее фазы безразлично, в каком порядке складывались векторы э. д. с. пазов *1*, *2*, *7* и *8*. На рис. 1-14,*в* дана звезда пазовых э. д. с. этой катушечной группы. Определим результирующую э. д. с. Для этого к векторам пазов *1* и *2*, лежащих под северным полюсом, следует прибавить векторы пазов *7* и *8*, лежащих под южным полюсом с обратным знаком (векторы *7′* и *8′*).

На рис. 1-14,*г* дан вектор результирующей э. д. с. катушечной группы, соединенной по схеме рис. 1-14,*а*, а на рис. 1-14,*д* дан вектор результирующей величины напряжения той же катушечной группы, соединенной по схеме рис. 1-14,*б*. При сравнении можно установить, что величина э. д. с. и их фазы совершенно идентичны. Таким образом, целесообразнее производить соединение по схеме рис. 1-14,*б*, так как в этом случае катушки в катушечной группе не пересекаются между собой.

Используя этот принцип, на рис. 1-15,*а* представляем практическую схему однослойной обмотки $z=24$; $2p=4$ с минимальным количеством пересечений катушечных

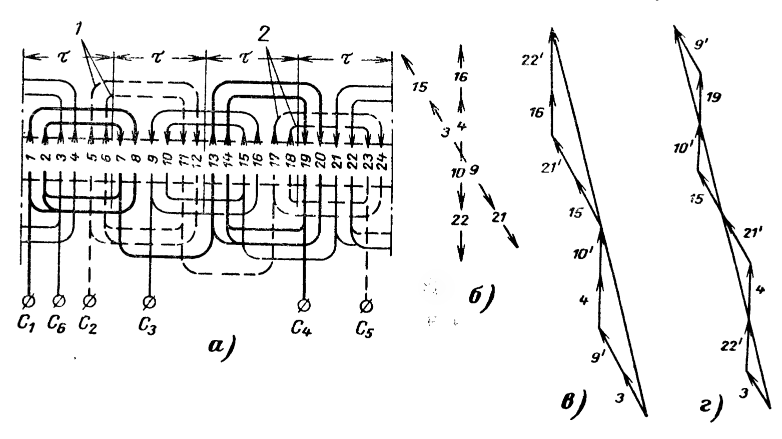


Рис. 1-15. Однослойная обмотка с наименьшим числом пересечений в лобовых частях с разным шагом.
$z=24$; $q=2$; $2p=4$.

а — схема; *б* — звезда пазовых э. д. с. фазы *C*; *в* — э. д. с. фазы с одинаковым шагом; *г* — то же с разным шагом; *1* — прямые катушки; *2* — изогнутые катушки.

групп в лобовых частях. На рис. 1-15,*б*—*г* показано построение результирующего вектора фазы *C* на основе схем рис. 1-14,*а* (рис. 1-15,*в*) и 1-15,*а* (рис. 1-15,*г*). При сравнении видно, что в обоих случаях фазовые векторы получаются одинаковыми. Для составления схемы трехфазной обмотки не обязательно пользоваться звездой па-

зовых э. д. с. Гораздо проще составить схему и определить начала и концы фаз исходя из направления токов в пазах. Как известно, каждый полюс обмотки образуется тремя фазами или тремя катушечными группами, принадлежащими разным фазам. Токи в пазах во всех трех фазах, образующие полюс, должны иметь одинаковые направления. Пусть под северным полюсом они будут направлены снизу вверх (рис. 1-14,*а*), тогда под южным полюсом будут сверху вниз. Чередование полюсов происходит через $3q$ пазов. В соответствии с этим на рис. 1-15,*а* расставлены направления токов в пазах, обеспечивающие правильное чередование полюсов. Если указать направление токов на входе фаз обмотки, то можно установить, что направление тока в начале одной фазы (в нашем случае фаза *С*) противоположно направлению тока в двух других фазах, как это и следует из векторной диаграммы токов трехфазной системы. Пользуясь этим, можно составить развернутую схему любого типа трехфазной обмотки.

1-5. ЗВЕЗДА Э. Д. С. ОБМОТКИ

В отличие от звезды пазовых э. д. с., показывающей положение отдельных пазов в магнитном поле, звезда э. д. с. обмотки дает в масштабе величину и фазу э. д. с. витков (катушек), представленных пучком векторов, геометрическая сумма которых равна э. д. с. фазы.

Звезда пазовых э. д. с. дана на рис. 1-13,*г* 24 векторами пазовых э. д. с., обозначенных цифрами без штрихов. При обходе фазы обмотки (рис. 1-15,*а*) в одной части проводников э. д. с. направлена снизу вверх, а в другой, расположенной под противоположным полюсом, — сверху вниз. Например, э. д. с. проводника первой катушки фазы *1* находится в пазу *1* и проходит снизу вверх, а э. д. с. паза проводника *7* направлена сверху вниз.

Для получения э. д. с. витков этой катушки надо из вектора *1* (рис. 1-14,*в*) вычесть вектор *7*. Однако, как было сказано ранее, вычитание векторов можно заменить сложением, прибавляя к вектору *1* вектор *7'*, полученный поворотом вектора *7* на 180 *эл. град.* В соответствии с этим на рис. 1-16,*а* изображены 12 векторов пазовых э. д. с., обозначенных цифрами без штрихов, и 12 векторов, обозначенных цифрами со штрихами, но повернутых

на 180 *эл. град.* На рис. 1-16,*а* дана звезда э. д. с. обмотки, построенная так же, как описано выше.

Условимся обозначать таким же образом стороны катушек в зависимости от направления э. д. с. и прохождения их при обходе схемы обмотки, тогда порядок соединения сторон катушек обмоток (рис. 1-15,*а*) опреде-

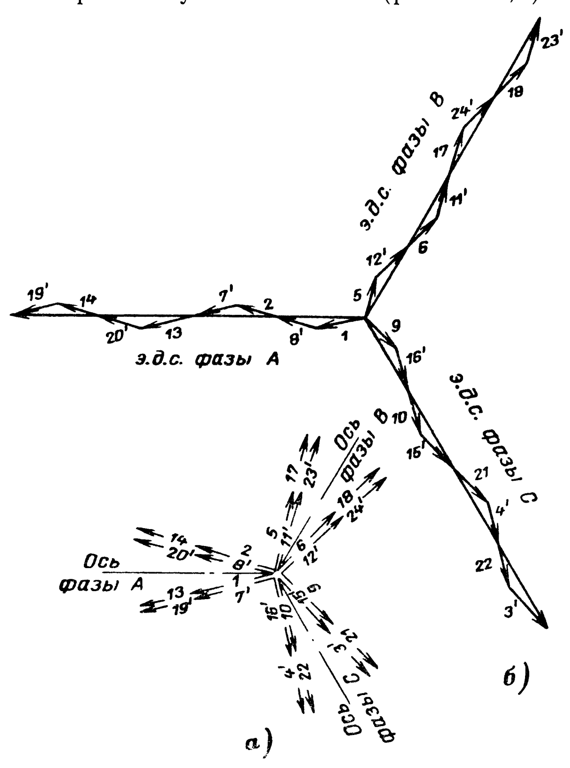


Рис. 1-16. Э. д. с. при $z=24$; $2p=4$; $q=2$.

а — звезда э. д. с. обмотки; *б* — диаграмма э. д. с. фаз.

ляется следующим образом: фаза *А*: C_1—*1*—*8'*—*2*—*7'*—*13*—*20'*—*14*—*19'*—C_4; фаза *В*: C_2—*5*—*12'*—*6*—*11'*—*17*—*24'*—*18*—*23'*—C_5; фаза *С*: C_3—*9*—*16'*—*10*—*15'*—*21*—*4'*—*22*—*3'*—C_6.

Каждая фаза в звезде э. д. с. обмотки будет соответствовать сосредоточенной группе векторов (пучку векторов), результирующие геометрических сумм которых имеют оси, сдвинутые друг относительно друга на угол 120°. Это свидетельствует о том, что в результате соеди-

нения катушек обмотки образуется правильная трехфазная система. Из звезды э. д. с. обмотки (рис. 1-16,*а*) видно, что каждая фаза состоит из двух полуфаз, э. д. с. которых равны по абсолютной величине и по фазе. Поэтому данная обмотка даст возможность производить соединение не только последовательно, как это изображено на рис. 1-15,*а*, но и в две параллельные ветви.

На основании звезды э. д. с. обмотки можно легко построить диаграмму фазовых э. д. с. (рис. 1-16,*б*).

1-6. СОЕДИНЕНИЕ КАТУШЕК В КАТУШЕЧНЫЕ ГРУППЫ И КАТУШЕЧНЫХ ГРУПП В ФАЗЫ

Последовательное соединение катушек в катушечные группы. На рис. 1-17 показано последовательное соединение катушек в катушечные группы: двухслойных обмоток, простой однослойной концентрической обмотки и однослойной концентрической обмотки, выполненной «вразвалку».

Из рис. 1-17,*а—в* видно, что для последовательного соединения катушек в катушечные группы независимо от типа обмотки следует начало первой катушки оставить в качестве выводного конца катушечной группы, а конец первой катушки соединить с началом второй, конец второй с началом третьей и т. д. Конец последней катушки оставить как выводной конец катушечной группы. Такое соединение обеспечивает максимальную абсолютную величину суммарного вектора э. д. с. катушечной группы.

Последовательное соединение катушечных групп в фазе выполняется таким образом, чтобы полный ток фазы последовательно проходил по всем катушечным группам. При этом надо учитывать, что в однослойных концентрических обмотках (рис. 1-15,*а*) катушечные группы имеют различные длины лобовых частей. Поэтому соединение их должно выполняться таким образом, чтобы индуктивное и активное сопротивление фаз было по возможности одинаковым. Это условие обеспечивается включением одинакового количества длинных и коротких катушечных групп в каждую фазу.

Параллельное соединение обмоток. Для параллельного соединения обмоток необходимо соблюдение трех условий:

1) равенства э. д. с. элементов обмотки, соединяемых в параллельные ветви;

2) совпадения фаз э. д. с.;

3) равенство активного и индуктивного сопротивлений.

Это означает, что катушки, соединяемые параллельно, должны быть совершенно одинаковыми и расположены симметрично по отношению к осям полюсов. Параллельное соединение катушек внутри катушечной группы недопустимо, так как условия параллельного соединения при этом не выполняются. Действительно, двухслойные, однослойные и цепные обмотки (рис. 1-17,*а*) имеют одинаковый шаг, одинаковые геометрические размеры, следовательно, величина э. д. с. в катушках катушечной группы одинакова. (Предполагается, что катушки имеют равное число витков). Однако они сдвинуты по отношению друг к другу в магнитном поле на один паз, и, следовательно, э. д. с. катушек не совпадает по фазе.

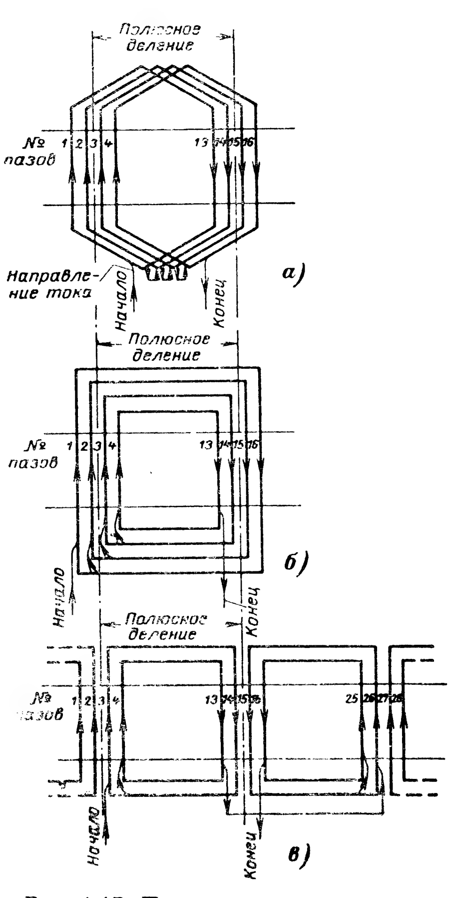


Рис. 1-17. Последовательное соединение катушек в катушечные группы.
а — однослойные и двухслойные шаблонные обмотки; *б* — однослойные концентрические обмотки; *в* — то же, выполненные «вразвалку».

В концентрических обмотках и в концентрических обмотках «вразвалку» (рис. 1-17,*б*, *в*) э. д. с. катушек в пределах катушечной группы совпадает по фазе. Однако вследствие разного шага катушек величина э. д. с. в них разная. Поэтому катушки внутри катушечной группы параллельно

соединять нельзя. Это положение касается всех видов петлевых обмоток машин переменного тока (однослойных, двухслойных с укороченным шагом, концентрических, шаблонных, цепных). В волновых двухслойных обмотках отдельные секции обмотки, лежащие под одним полюсом, могут быть включены в разные параллельные ветви таким образом, чтобы эквивалентные элементы обмоток под другим полюсом были бы соответственно переставлены и компенсировали бы возникающее при этом векторное неравенство данных элементов обмотки.

Если ошибочно допустить параллельное соединение катушек в катушечной группе, то под действием разности потенциалов параллельных ветвей в них появится уравнительный ток, замыкающийся по этому контуру, который может привести к недопустимому нагреву обмотки.

Таким образом, в пределах катушечной группы катушки должны соединяться только последовательно.

Параллельное соединение катушечных групп в обмотках с целым числом пазов на полюс и фазу. Катушечные группы в обмотках с целым числом пазов на полюс и фазу можно соединять параллельно, так как в этом случае соблюдаются все три условия параллельного соединения.

На рис. 1-18,*а—в* показаны катушечные группы различных типов обмоток; из рисунка видно, что катушечные группы двухслойной обмотки (рис. 1-18,*а*) расположены симметрично по отношению оси полюсов, их геометрические размеры и шаги по пазам равны. Следовательно, катушечные группы находятся в одинаковых электромагнитных условиях и наведенные э. д. с. в них равны по абсолютной величине и по фазе. Это дает возможность соединить катушечные группы параллельно.

Катушечные группы однослойной концентрической обмотки (рис. 1-18,*б* и *в*) также расположены симметрично относительно осей полюсов. Их средние шаги по пазам равны между собой, а значит, э. д. с. отдельных катушечных групп будут равны. Однако вследствие того, что катушечные группы располагаются в двух плоскостях, они имеют разные размеры. Средняя длина витков катушечных групп первой плоскости короче, чем

второй, а значит, их сопротивление при постоянном токе и индуктивное сопротивление также не равны. Таким образом, токи в параллельных ветвях распределяются неравномерно. Поэтому при образовании параллельных ветвей однослойной двухплоскостной обмотки в каждую

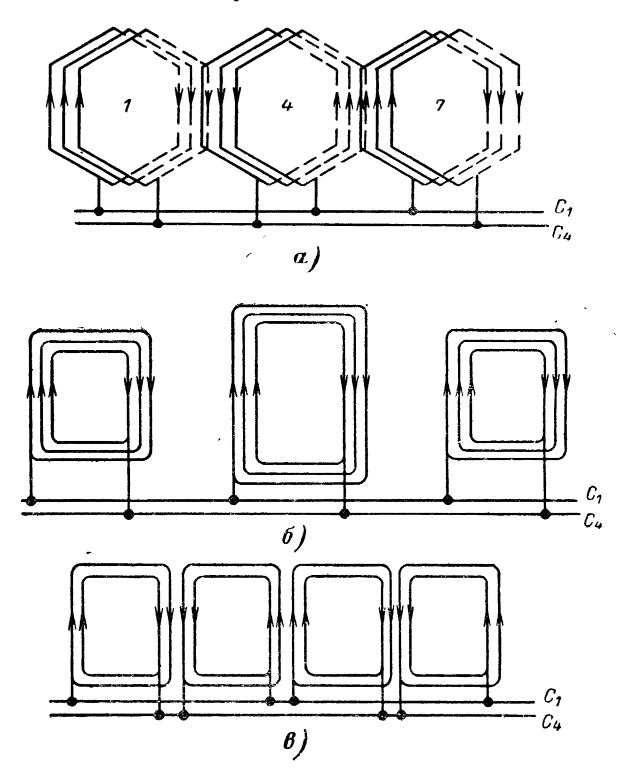


Рис. 1-18. Параллельное соединение обмотки.

а — двухслойных; *б* — однослойных концентрических; *в* — однослойных концентрических обмоток «вразвалку».

параллельную ветвь следует включать одинаковое количество «коротких» и «длинных» катушечных групп. Независимо от типа обмотки при параллельном соединении могут возникнуть уравнительные токи вследствие неравномерного воздушного зазора. Поэтому при эксплуатации должно уделяться особое внимание техническому состоянию подшипников. Для параллельного включения всех катушечных групп однослойной концентрической

или простой шаблонной обмотки (рис. 1-18,*б*) следует все начала катушечных групп подключить к выводному концу C_1 — это будет началом фазы, все концы катушечных групп подключить к выводному концу C_4 — это будет конец фазы.

Аналогично соединяются оставшиеся катушечные группы, образующие фазы *В* и *С*.

Для параллельного включения всех катушечных групп двухслойной или однослойной концентрической обмотки, выполненной «вразвалку», следует соединить в одну точку начало первой катушечной группы, конец второй, начало третьей, конец четвертой и т. д. и все это присоединить к выводному концу C_1. Это будет началом фазы. Оставшиеся выводные концы катушечных групп подключаются к выводному концу C_4 — это будет конец этой же фазы (рис. 1-18,*а*, *в*).

Аналогично включаются катушечные группы двух других фаз. Часто встречается, особенно в схемах машин с числом полюсов больше восьми, смешанное соединение катушечных групп в фазе, которые представляют собой комбинацию из последовательно и параллельно соединенных катушечных групп. Ниже при рассмотрении различных типов обмоток в каждом отдельном случае вопрос о параллельном соединении будет разобран более подробно.

1-7. СПОСОБЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ СХЕМ ОБМОТОК

Схема обмотки показывает в условной форме порядок соединения катушек, катушечных групп и фаз обмотки, обеспечивающий требуемые параметры электрической машины. Схема в отличие от чертежа изображается условными линиями. При этом элементы обмотки (катушки, катушечные группы, стержни и др.) имеют приближенное сходство с формой обмотки. Исключением являются упрощенные и круговые схемы двухслойных обмоток.

При составлении схем приняты следующие условности:

1. Катушка изображается одной линией независимо от количества витков и параллельных проводов.

2. Выводной конец катушки (катушечной группы), выходящий слева, принимают за «начало», а справа — **за «конец».**

3. Схема изображается в одной проекции, а верхние и нижние стороны в пазах указываются условными линиями; верхние стороны изображаются сплошными линиями, нижние — пунктирными.

4. В обмотках машин трехфазного тока разные фазы часто изображаются различными линиями: сплошными жирными, сплошными тонкими, прерывистыми и т. д.

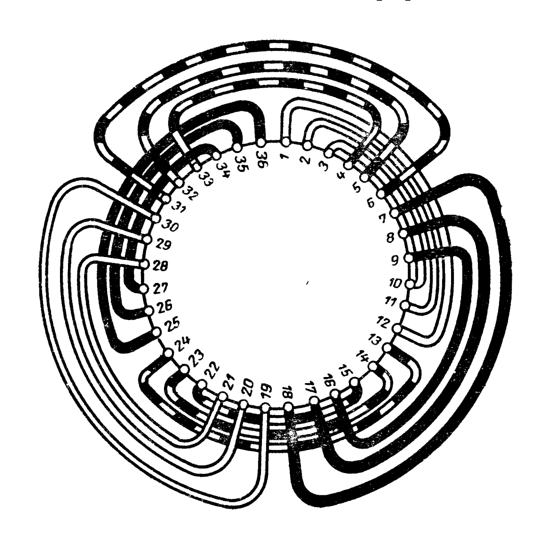


Рис. 1-19. Торцевая схема обмотки. $z=36$; $2p=6$.

Иногда для наглядности различные фазы изображаются линиями разного цвета.

В зависимости от типа обмотки и назначения чертежа-схемы существуют следующие способы изображения схем обмоток.

Торцевая схема. На рис. 1-19 представлено схематическое изображение торца статора с условным обозначением пазов и расположением лобовых частей, соответствующим действительности. Торцевые схемы очень наглядны при укладке обмотки в пазы. Однако этим способом невозможно изобразить схему соединения катушечных групп по фазам. Поэтому их часто называют монтажными. Но эти схемы следует рассматривать как вспомогательные к схемам-разверткам, так как они не

дают полного представления об обмотке, шаге катушек, составе катушечных групп.

Схема-развертка представляет собой мысленно разрезанную и развернутую на плоскость проекцию расточки статора или ротора с уложенной в них обмоткой.

На этих схемах в отличие от торцевых можно изобразить соединение катушек в катушечные группы и катушечных групп в фазы, а также сопряжение фаз между

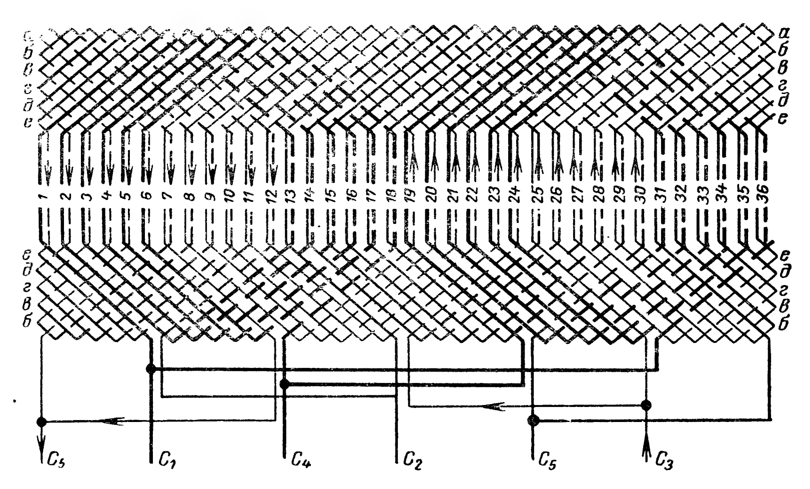


Рис. 1-20. Развернутая схема двухслойной обмотки.
$z=36$; $2p=2$.

собой (треугольником или звездой). При изображении развернутых схем двухслойных обмоток сторона, лежащая в первом слое, изображается сплошной линией, а сторона, лежащая во втором слое (на дне паза), — прерывистой линией.

Разные фазы, как и в однослойных обмотках, изображаются разными линиями (жирная, тонкая и прерывистая). Как видно из рис. 1-20, в развернутых схемах каждая катушка изображается в отдельности. Недостатком этих схем являются некоторые затруднения при их чтении, так как за громоздкостью не всегда бывает легко разобраться в принципиальном характере данной схемы, в особенности в применении к большим тихоходным машинам, имеющим несколько десятков полюсов и несколько сотен пазов. Поэтому в практику вводят раз-

личные приемы их упрощения, которые рассматриваются ниже.

Упрощенные способы изображения схем применяются главным образом для изображения схем двухслойных обмоток.

В упрощенных схемах наносится не каждая катушка в отдельности, а вся катушечная группа. На рис. 1-21 представлен один из возможных способов изображения схем. Такое изображение допустимо потому, что катушки соединяются в катушечные группы только последовательно, и поэтому для решения целого ряда вопросов нет необходимости в их отдельном изображении в схемах. Для составления принципиальной упрощенной схемы следует изобразить столько прямоугольников, сколько катушечных групп имеется во всей обмотке. В левом углу прямоугольника ставится порядковый номер данной катушечной группы по окружности статора, в правом — количество последовательно соединенных катушек. В катушечной группе далее указывают направление токов, для чего произвольно задаются направлением тока в первой катушечной группе: в остальных катушечных группах направление токов определится исходя из того, что катушечные группы двухслойных обмоток соединяются «встречно», следовательно, токи в них направлены навстречу друг другу.

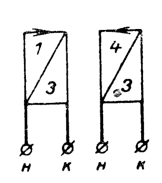


Рис. 1-21. Упрощенное изображение катушечных групп.

Соединение катушечных групп в схеме (имеется в виду последовательное соединение) может быть выполнено в двух вариантах:

а) с короткими перемычками, т. е. 1-я соединяется с 4-й, 4-я с 7-й, 7-я с 13-й и т. д. (рис. 1-22);

б) с длинными перемычками, в этом случае 1-я катушечная группа соединяется с 7-й, 7-я с 13-й и т. д. (рис. 1-23).

При выборе вида соединения, если нет каких-либо специальных соображений, стремятся выполнить схему с короткими перемычками.

Схемы с длинными перемычками применяются в многоскоростных двигателях, а также в схемах с параллельными ветвями (для уменьшения уравнительных токов,

которые могут возникнуть вследствие неравномерного зазора).

Круговые упрощенные схемы. В настоящее время получили распространение так называемые круговые схемы, на которых катушечные группы располагаются по окружности. На рис. 1-24 дана упрощенная круговая

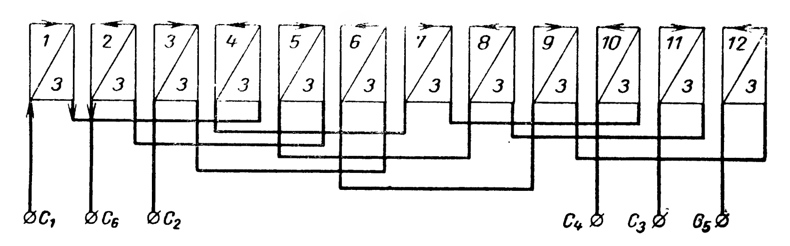


Рис. 1-22. Упрощенная схема обмотки с короткими перемычками при $2p=4$; $q=2$.

схема двигателя с числом полюсов $2p=4$, с короткими перемычками, сопряжение фаз — звезда, соединение катушечных групп в фазе — последовательное.

Как видно из рисунка, схема состоит из двух частей: наружной круговой и внутренней. В наружной части условно показаны (отрезками окружности) все катушеч-

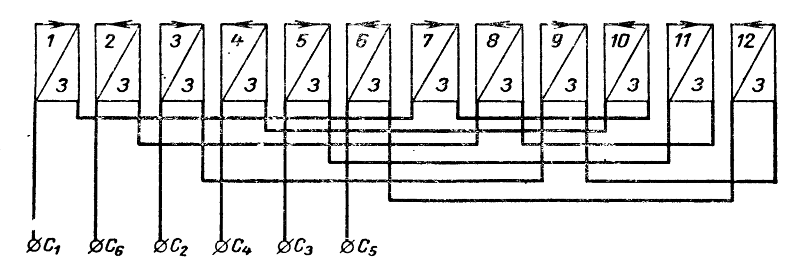


Рис. 1-23. Упрощенная схема обмотки с длинными перемычками при $2p=4$; $q=3$.

ные группы с обозначением номера фаз, межкатушечные соединения и сопряжение фаз. Такое изображение дает возможность легко установить направление тока в каждой катушечной группе. Внутренняя часть схемы показывает более наглядно сопряжение фаз и соединение катушечных групп между собой, но не дает представления о межкатушечных соединениях. Таким образом, внутрен-

няя часть схемы является принципиальной, а наружная — монтажной.

Недостатком изображения круговых схем является необходимость деления окружности на число частей, соответствующих числу полюсов двигателя.

При большом количестве полюсов изображение, а также пользование этими схемами затруднительно.

Условные схемы. Наряду с принципиальными и круговыми упрощенными схемами в настоящее время для изображения схем двухслойных обмоток статоров большое распространение получили так называемые условные схемы.

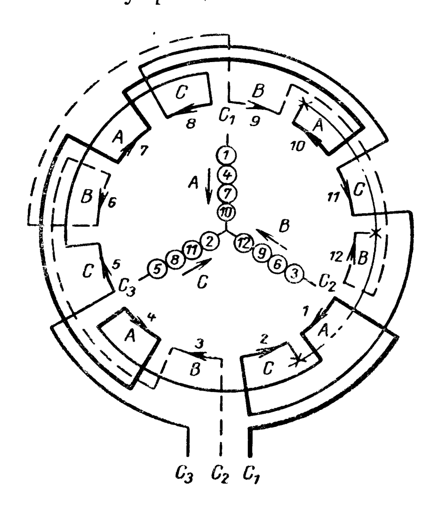


Рис. 1-24. Круговая схема **обмотки.** $2p=4$.

Если условиться, что катушечная группа *1* принадлежит фазе *А*, то согласно чередованию фаз рядом лежащие катушечные группы распределяются следующим образом. Катушечная группа *2* будет принадлежать фазе *С*, катушечная группа *3* — фазе *В*, катушечная группа *4* — снова фазе *А* и т. д. Отсюда нетрудно заметить, что катушечные группы, принадлежащие одноименным фазам, будут иметь номера, отличающиеся на три единицы, а именно: фаза *А* — 1; 4; 7; 10; 13; 16; фаза *В* — 3; 6; 9; 12; 15; 18; фаза *С* — 2; 5; 8; 11; 14; 17.

На рис. 1-25,*а* дано изображение упрощенной схемы одной фазы двухслойной обмотки с числом полюсов $2p=4$. Для перехода от этой схемы к условной выводные концы катушечных групп условно изобразим так, как показано на рис. 1-25,*б*; здесь на начало катушечной группы берется вывод, идущий в нижнее основание, а конец катушечной группы выходит из верхней части прямоугольника.

При сравнении схем на рис. 1-25,*а* и *б* видно, что они принципиально не отличаются.

Для дальнейшего упрощения заменим изображение катушечных групп их выводными концами так, как это показано на рис. 1-25,*в*. Каждый выводной конец изображен прямоугольником с номером, соответствующим номеру катушечной группы. Рассуждая таким образом, изобразим условную схему фазы *B* (рис. 1-25,*г*) и фазы *C* (рис. 1-25,*д*).

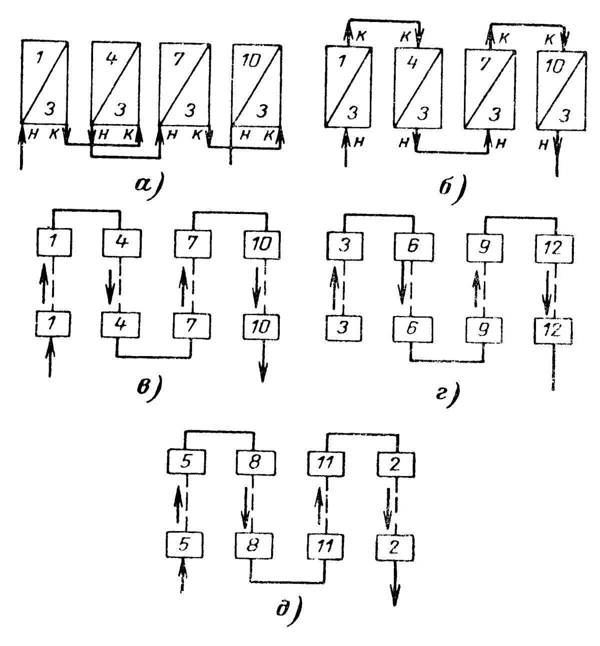


Рис. 1-25. Условное изображение схемы двухслойной обмотки.

а, б — упрощенное изображение фазы *А*; *в, г, д* — условное изображение фаз *А, В, С*.

Если сравнить условные схемы всех трех фаз, можно установить, что соединение их совершенно идентично. Если совместить три фазы и повернуть схему на 90° по часовой стрелке, получим полную условную схему трехфазной обмотки. На рис. 1-26 дана полная условная схема для трех фаз. Как видно из этой схемы, номера выводных концов катушечных групп по горизонтали отличаются на две единицы, а по вертикали — на три. Номера начал первых катушечных групп *1, 3, 5* не зависят от числа полюсов и являются началами фаз. Номера

катушечных групп, к которым присоединяются концы фаз, исходя из наименьшего возможного сдвига между фазами (120 *эл. град*) будут равны:

для фазы $A - 3 \cdot 2p - 2$; для фазы $B - 3 \cdot 2p$; для фазы $C - 2$. В нашем случае при $2p=8$ для фазы $A - 3 \cdot 2p - 2 = 3 \cdot 2 \cdot 4 - 2 = 22$; для фазы $B - 3 \cdot 2p = 24$; для фазы $C - 2$.

В двухслойных обмотках число катушечных групп в фазе равно числу полюсов, поэтому на условной схе-

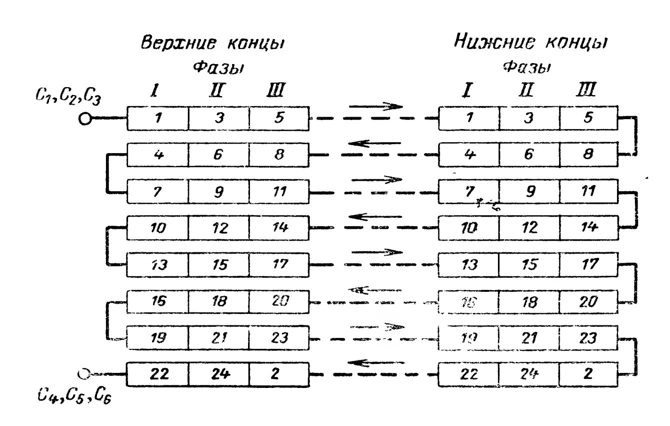


Рис. 1-26. Условная схема обмотки. $2p=8$, $a_2=1$.

ме по вертикали располагают столько номеров выводных концов, сколько полюсов имеет двигатель (в нашем случае восемь). По горизонтали располагают три выводных конца в соответствии с числом фаз. При соединении катушечных групп последовательно с короткими перемычками изображения условных схем весьма просты; направления обходов всех катушечных групп образуют непрерывную «змейку», как это показано на рис. 1-26.

При параллельном соединении катушечных групп в фазы к выводному концу C_1 присоединяются начало первой, конец, четвертой начало седьмой, конец десятой групп и т. д. Оставшиеся выводные концы катушечных групп подключаются к выводу C_4 (рис. 1-27).

Для контроля правильности выполнения схемы, имеющей параллельные ветви, можно руководствоваться следующими правилами: при параллельном или смешанном

соединении (для любого числа возможных параллельных ветвей) направление обходов катушечных групп по всем горизонтальным строкам должно совпадать с направле-

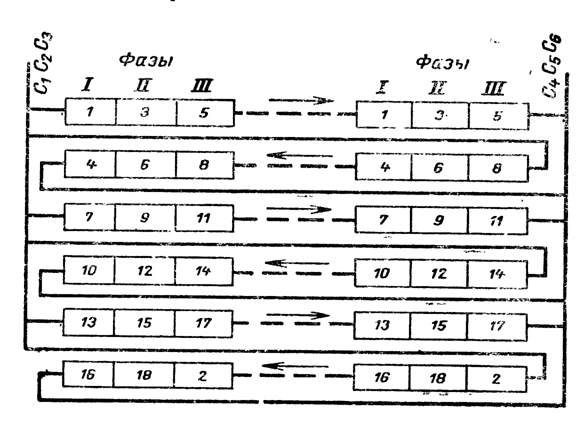


Рис. 1-27. Схема обмотки.
$2p=6$; $a_2=2p$.

нием обхода горизонтальных строк по «змейке» последовательного соединения. На рис. 1-26 и 1-27 направление токов показано стрелками.

1-8. КЛАССИФИКАЦИЯ ОБМОТОК МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Классификацию обмоток машин переменного тока можно производить по следующим признакам.

1. По характеру исполнения — ручные, шаблонные.

2. По форме отдельных элементов обмотки — катушечные, стержневые.

3. По расположению в электрической машине — закладываемые в пазы и монтируемые на сердечниках.

4. По расположению в пазу — однослойные, двухслойные.

5. По способу соединения катушечных групп (секций) петлевые и волновые.

6. По уровню номинального напряжения — низкого напряжения (до 500 $в$) и высокого напряжения (свыше 500 $в$).

7. По числу пазов на полюс и фазу с целым q и дробным q

$q = b + \frac{c}{d}$ — дробное число.

8. По шагу — с диаметральным шагом $y_0 = \tau$ и недиаметральным $y_0 \neq \tau$.

Кроме того, имеются еще некоторые типы обмоток: несимметричные, многоскоростные для переключения числа полюсов, обмотки с разновитковыми катушками, а также цепные обмотки.

Несмотря на все разнообразие обмоток и схем и богатство признаков их классификации, все обмотки переменного тока можно свести к следующим основным типам.

I. *Простые катушечные концентрические обмотки.* Они всегда однослойные, почти исключительно ручные; могут быть с целым и дробным числом пазов на полюс и фазу (чаще бывают с целым числом пазов).

II. *Однослойные шаблонные обмотки.* В отличие от простых катушечных концентрических обмоток шаблонные выполняются катушками одинаковых размеров и формы. Они имеют одинаковые активное и индуктивное сопротивления по фазам.

По своему исполнению они подразделяются на три группы: а) простые шаблонные; б) с двойными и чередующимися шагами; в) цепные обмотки.

III. *Двухслойные катушечные обмотки* также являются шаблонными, но отличаются от них тем, что катушки их занимают половину паза, в то время как однослойные занимают полностью паз.

По схеме соединения катушечных групп все три типа обмоток могут включаться как согласно, так и встречно.

Все обмотки, выполненные со встречным включением полугрупп, называются обмотками вразвалку.

Двухслойные обмотки включаются только встречно, и с этой точки зрения они являются обмотками, выполненными вразвалку.

Исключением являются двухскоростные двигатели, у которых обмотка включается согласно для меньшей ступени скорости, и в этом случае они подобны простым шаблонным обмоткам.

IV. *Стержневые обмотки выполняются* как двухслойные, реже однослойные и являются шаблонными обмот-

ками. Выполняются как с целым, так и с дробным q. Они получили распространение для фазных роторов асинхронных двигателей.

V. *Специальные обмотки.* а) Несимметричные обмотки. Различают два типа несимметричных обмоток:

1. Знаменатель дробности d в обмотках с дробным числом пазов на полюс и фазу равен или кратен числу фаз m.

2. Число пазов z не кратно числу фаз m.

б) Обмотки с разновитковыми катушками.

в) Обмотки многоскоростных двигателей.

г) Специальные схемы электрических машин, работающих регуляторами, усилителями, и др.

В данной книге мы не имеем возможности рассмотреть все многообразие обмоток электрических машин и схем их соединения. Поэтому мы остановимся на трехфазных обмотках машин переменного тока и на тех типах, которые наиболее часто встречаются в практике эксплуатации и ремонта.

По мере рассмотрения различных видов обмоток и схем соединений будут указаны области их применения для различных типов электрических машин.

Глава вторая

ОДНОСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ

2-1. ПРОСТЫЕ КАТУШЕЧНЫЕ КОНЦЕНТРИЧЕСКИЕ ОБМОТКИ

Простые катушечные концентрические обмотки со сплошными фазными зонами — это однослойные обмотки, состоящие из катушек с различными шагами, концентрически расположенными одна в другой (рис. 1-15,*а*). Принцип выполнения трехфазной простой катушечной концентрической обмотки был разобран на примере звезды пазовых э. д. с. (рис. 1-13).

Концентрическая обмотка раньше применялась довольно часто, она изготавливается вручную путем укладки через шлиц или «впротаску» (закрытый паз). В настоящее время машины малых и средних мощностей выполняются двухслойными или однослойными шаблонными обмотками. Простые катушечно-концентрические

обмотки применяются для машин с разъемными статорами, а также для двигателей с одной парой полюсов. В этом случае применяются катушечно-концентрические обмотки, выполненные вразвалку. В случае закрытого паза (особенно двигатели высокого напряжения) обмотка выполняется не впротаску, а разрезная. Это обеспечивает более высокое качество выполнения обмотки, а значит, и эксплуатационную надежность.

Шаг обмотки. Катушечные концентрические обмотки со сплошными фазными зонами в электрическом отношении являются обмотками с диаметральным шагом, но каждая катушка имеет свой шаг, в общем случае отличный от диаметрального. Таким образом, в этих обмотках различают действительные шаги отдельных катушек и средний расчетный шаг катушечной группы, равный величине полюсного деления τ.

Определение шагов отдельных катушек начинают с малой катушки, шаг которой выбирают таким образом, чтобы внутри ее поместились две фазные зоны двух других фаз.

Каждая фазная зона занимает q пазов, следовательно, шаги секций будут равны:

$$\left.\begin{array}{l} y_1 = 1 + 2q; \\ y_2 = 3 + 2q; \\ y_3 = 5 + 2q; \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ y_q = (2q-1) + 2q, \end{array}\right\} \quad (2\text{-}1)$$

где y_1, y_2. y_3, ... , y_q — шаги отдельных катушек.

Средний шаг катушечной группы будет равен:

$$y_{ср} = \frac{y_1 + y_q}{2} = \frac{1 + 2q + 2q - 1 + 2q}{2} = 3q = \tau. \quad (2\text{-}2)$$

Пример. Электродвигатель имеет $z=36$ пазов, число полюсов $2p=4$. (рис. 2-1). Определить шаги отдельных катушек и средний шаг катушечной группы.

Определим число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3.$$

Следовательно, катушечная группа состоит из трех последовательно соединенных катушек; определим их шаги из (2-1):

$$y_1 = 1 + 2q = 1 + 2\cdot3 = 7;\ y_2 = 3 + 2q = 3 + 2\cdot3 = 9;$$

$$y_3 = 5 + 2q = 5 + 2\cdot3 = 11;$$

средний шаг катушечной группы

$$y_{ср} = \frac{y_1 + y_3}{2} = \frac{7 + 11}{2} = 9.$$

Действительно,

$$\tau = \frac{z}{2p} = \frac{36}{4} = 9,$$

т. е. средний шаг равен полюсному делению τ и является диаметральным.

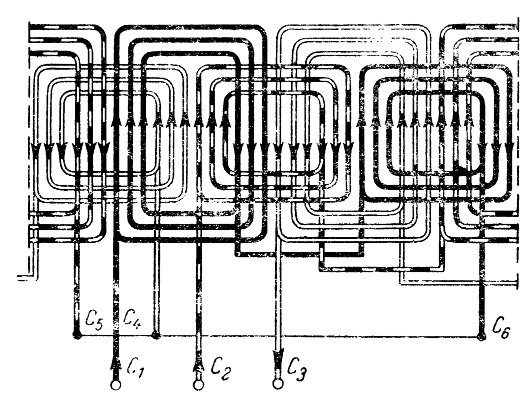


Рис. 2-1. Схема однослойной концентрической обмотки.
$2p=4$; $q=3$.

Число катушечных групп в зависимости от числа пар полюсов p. Каждая катушечная группа простой катушечной обмотки образует одну пару полюсов. Если число пар полюсов p умножить на число фаз m, получим общее число катушечных групп для обеспечения необходимого числа пар полюсов в обмотке:

$$A_0 = mp, \tag{2-3}$$

где A_0 — число катушечных групп в обмотке.

Расположение лобовых частей катушечных обмоток. Как видно из рис. 2-1, лобовые части катушечных групп различных фаз на схеме пересекаются между собой. Путем отгиба лобовых частей при монтаже обмотки и расположении их в разных плоскостях можно избежать их пересечения.

В большинстве случаев они располагаются в двух плоскостях (рис. 2-2,*а*). Такие обмотки называются двухплоскостными (двухъярусными). В некоторых случаях обмотки располагаются в трех плоскостях и называются трехплоскостными (трехъярусными), рис. 2-2,*б*.

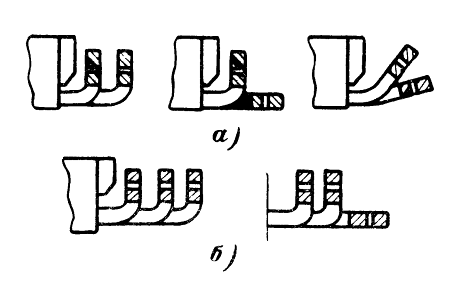


Рис. 2-2. Расположение лобовых частей однослойной концентрической обмотки.

а — двухплоскостная; *б* — трехплоскостная.

Трехплоскостные обмотки применяются в основном для двухполюсных машин, где число последовательно соединенных катушек в катушечной группе обычно бывает сравнительно большим. Применение двухплоскостных обмоток для таких машин создало бы большие затруднения при их размещении.

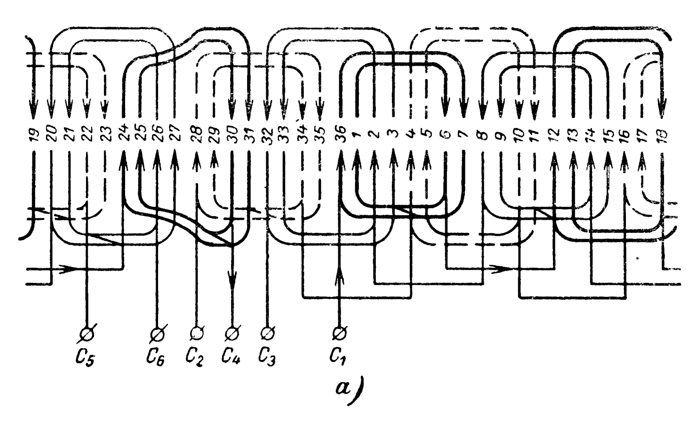
Трехплоскостная обмотка применяется также в машинах с разъемным статором, а также для устранения «кривой» катушечной группы при нечетном числе пар полюсов (о кривой — переходной катушечной группы см. ниже).

Из соотношения (2-3) число катушечных групп пропорционально числу пар полюсов. Следовательно, если p — число четное, то общее число катушечных групп в трехфазной обмотке также будет четным. В этом случае их лобовые части легко расположить в двух плоскостях.

Пусть $p=2$, тогда число катушечных групп из (2-3)

$$A_0 = pm = 2 \cdot 3 = 6.$$

Лобовые части трех катушечных групп располагаются в одной плоскости, а остальных трех катушечных групп — в другой (см. рис. 2-1). Если число пар полюсов в машине нечетное, то общее число катушечных групп



также будет нечетным и, следовательно, их невозможно разделить на две равные части. Пусть электродвигатель имеет нечетое число пар полюсов $p=3$, тогда общее число катушечных групп

$$A_0 = pm = 3 \cdot 3 = 9.$$

Для того чтобы расположить девять катушечных групп в двух плоскостях, поступают следующим образом: четыре катушечные группы (рис. 2-3) располагают в первой плоскости, другие четыре — во второй. Девятая катушечная группа располагается одной стороной в первой плоскости, другой стороной — во второй (рис. 2-3,*а*, *б*), ее называют переходной группой.

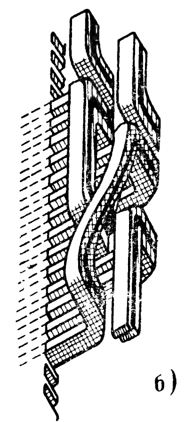


Рис. 2-3. Однослойная концентрическая обмотка.
$2p=6$; $q=2$.
а — схема обмотки; *б* — переходная катушечная группа.

2-2. СОЕДИНЕНИЕ КАТУШЕЧНЫХ ГРУПП ПРОСТЫХ КОНЦЕНТРИЧЕСКИХ ОДНОСЛОЙНЫХ ОБМОТОК

Катушечные группы концентрических однослойных обмоток могут соединяться последовательно, параллельно и смешанно. Независимо от типа соединения они должны быть соединены таким образом, чтобы во всех катушечных группах направление токов было одинаковым;

как видно из рис. 2-1, для последовательного соединения катушечных групп следует начало первой катушечной группы соединять с выводным концом фазы C_1, а конец первой — с началом второй, конец второй идет на выводной конец фазы C_4.

Максимальное число параллельных ветвей однослойной концентрической обмотки равно числу катушечных групп в фазе, но так как каждой катушечной группе

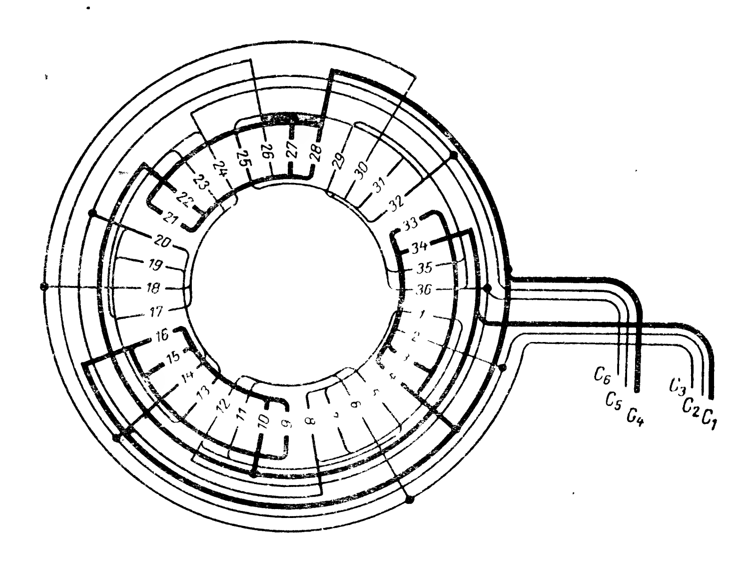


Рис. 2-4. Круговая схема обмотки. $2p=6$; $a_2=p=3$.

соответствует одна пара полюсов, то максимальное число параллельных ветвей a_2 равно числу пар полюсов p.

На рис. 2-4 дана круговая упрощенная схема обмотки электродвигателя, имеющего три пары полюсов при $p=3$. Как видно из схемы, здесь можно образовать три параллельные ветви (по числу пар полюсов). Для параллельного соединения катушечных групп простой концентрической обмотки необходимо все начала катушечных групп фазы соединить между собой и подвести к выводному концу фазы $I - C_1$. Это будет началом фазы. Оставшиеся выводные концы катушечных групп присоединить ко второму выводному концу фазы

$I - C_4$ — это будет конец фазы. Аналогично соединяются две другие фазы.

Очень часто встречается смешанное соединение катушечных групп, особенно в многополюсных двигателях средней мощности. Оно выполнимо при условии, если частное от деления числа пар полюсов на число параллельных ветвей будет равно целому числу:

$$\frac{p}{a_2} = \text{целому числу.}$$

Пример. Обмотку электродвигателя, имеющего 32 полюса, нужно соединить в четыре параллельные ветви:

$$\frac{p}{a_2} = \frac{16}{4} = 4, \text{ т. е. равно целому числу.}$$

Следовательно, такое соединение можно выполнить.

Условия выполнимости простых однослойных концентрических катушечных обмоток.

1. Число пазов статора должно быть четным, так как общее число катушек обмотки всегда равно половине числа пазов:

$$\frac{z}{2} = \text{целому числу.}$$

2. Для того чтобы обмотка была симметричной, каждая фаза должна занимать одно и то же число пазов. Это приводит к условию:

$$\frac{z}{m} = \text{целому числу.}$$

3. Частное от деления общего числа катушечных групп всей обмотки на число параллельных ветвей и число фаз должно быть целым числом:

$$\frac{A_0}{a_2 m} - \text{целому числу.}$$

2-3. ОДНОСЛОЙНЫЕ КОНЦЕНТРИЧЕСКИЕ ОБМОТКИ, ВЫПОЛНЕННЫЕ «ВРАЗВАЛКУ»

В отличие от простых концентрических однослойных обмоток, где катушечная группа состоит из q последовательно соединенных катушек, в обмотках, выполненных «вразвалку», катушечные группы делятся на две полугруппы, в каждой из которых $q/2$ последовательно соеди-

ленных катушек. Лобовые части этих полугрупп как бы разваливаются на две стороны. Соединение полугрупп в схеме фазы производится с таким расчетом, чтобы в пазовой части направления токов остались такими же, как и в простой однослойной концентрической обмотке со сплошными фазными зонами.

Эти обмотки применяются при $q \geqslant 4$. В этом случае лобовые части занимают много места, что приводит к увеличению размеров двигателя и расходу меди. Кроме того, концентрические однослойные обмотки «вразвалку» могут быть применены для устранения кривой катушки в двигателях с нечетным числом пар полюсов.

При выполнении обмотки «вразвалку» средний шаг катушечной группы значительно меньше диаметрального. Однако в электрическом отношении они эквивалентны простым концентрическим однослойным обмоткам с диаметральным шагом.

Шаг концентрической обмотки, выполненной «вразвалку». В отличие от простых концентрических обмоток, где количество шагов отдельных катушек равно числу пазов на полюс и фазу q, в обмотках, выполненных «вразвалку», количество шагов в 2 раза меньше и равно $q/2$. Отсюда следует, что средний шаг полугруппы, содержащий $q/2$ катушек обмотки, выполненной «вразвалку», будет меньше среднего шага катушечной группы, содержащей q катушек простой концентрической обмотки.

Соединение катушечных полугрупп в фазе. На рис. 2-7,*б* дана схема последовательного соединения полугруппы обмотки двигателя, имеющего $2p=2$ и $q=4$, из которой видно, что для последовательного соединения обмотки следует конец первой полугруппы соединить с концом соседней полугруппы этой же фазы. Аналогично соединяются остальные две фазы. В однослойных обмотках, выполненных «вразвалку», максимальное число параллельных ветвей (при четном q) равно числу полюсов $2p$. На рис. 1-18,*в* дана схема параллельного соединения обмотки, выполненной «вразвалку», из которой видно, что параллельное соединение катушечной полугруппы осуществляется следующим образом: к выводному концу — начало первой фазы C_1 присоединяются начала всех нечетных полугрупп данной фазы и концы всех четных. К выводному концу первой фазы C_4 присоединяются начала всех четных полугрупп и концы

нечетных. Остальные фазы соединяются аналогично. Смешанное соединение, представляющее собой комбинацию из полугрупп, соединенных последовательно и параллельно, выполняются в соответствии с описанным выше принципами соединения начал и концов полугрупп для последовательного и параллельного соединения.

Катушечные обмотки вразвалку при q, равном нечетному числу. Если число пазов на полюс и фазу q равно нечетному числу, то разделить на две равные полугруппы не представляется возможным. Эта обмотка может быть выполнена, если одна полугруппа будет состоять из $\frac{q+1}{2}$ последовательно соединенных катушек, а вторая из $\frac{q-1}{2}$. Максимальное число параллельных ветвей в этом случае будет в 2 раза меньше, чем в обмотках при q, равном четному числу, и равно числу пар полюсов.

Пример. Выполнить схему обмотки вразвалку для электродвигателя, имеющего $z=30$; $2p=2$;

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{30}{2\cdot 3}=5;\ \frac{q}{2}=2\frac{1}{2}.$$

Одна полугруппа состоит из трех последовательно соединенных катушек, другая из двух. Схема обмотки дана на рис. 2-5.

Сравнение простых концентрических обмоток с обмотками, выполненными вразвалку, проведем на примере электродвигателя, имеющего $z=24$ паза, $2p=2$ и $a_2=1$.

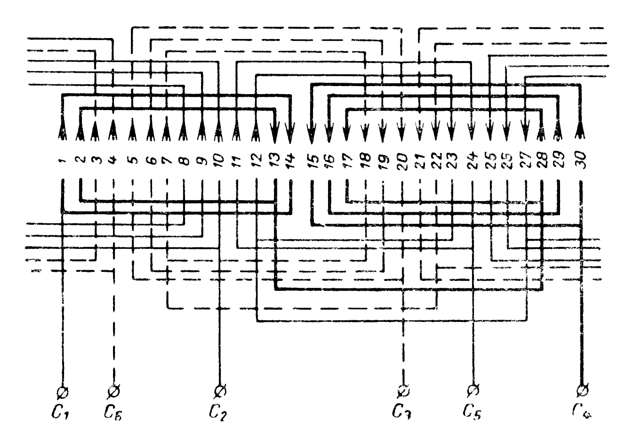


Рис. 2-5. Схема обмотки «вразвалку». $2p=2$; $q=5$.

1. Простая концентрическая обмотка.

Число катушечных групп

$$A_0 = pm = 3 \cdot 1 = 3.$$

Число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{24}{2 \cdot 3} = 4.$$

Шаги отдельных катушек:

$$y_1 = 1 + 2q = 1 + 2 \cdot 4 = 9; \qquad y_3 = 5 + 2q = 5 + 2 \cdot 4 = 13;$$

$$y_2 = 3 + 2q = 3 + 2 \cdot 4 = 11; \qquad y_4 = 7 + 2q = 7 + 2 \cdot 4 = 15.$$

Средний шаг обмотки равен:

$$y_{\text{ср}} = \frac{y_1 + y_4}{2} = \frac{9 + 15}{2} = 12.$$

Для составления схемы построим звезду пазовых э. д. с.

Сдвиг по фазе между соседними пазами определим из соотношения (1-12)

$$\alpha = \frac{60}{q} = \frac{60}{4} = 15 \text{ эл. град.}$$

Направление э. д. с. под северным и южным полюсами дано на рис. 2-6,*а* На рис. 2-6,*б* построена полная звезда пазовых э. д. с. этой обмотки, где углы между соседними векторами составляют 15 *эл. град.*

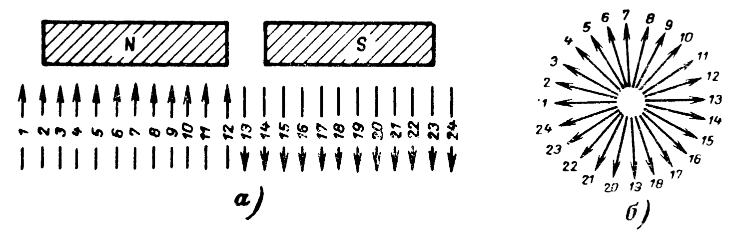


Рис. 2-6. Звезда пазовых э. д. с. обмотки.
$2p=2$; $q=4$; $z=24$.

а — направление э. д. с. под северным и южным полюсом; *б* — звезда пазовых э. д. с.

Расположим начала катушек обмотки первой фазы в пазах *1*, *2*, *3*, *4*, тогда концы этих катушек следует расположить на расстоянии их шагов соответственно в пазах *16*, *15*, *14*, *13*.

Фаза *В* сдвинута по отношению фазы *А* на 120 *эл. град,* что соответствует векторам пазовых э. д. с. *9*. *10*, *11*, *12*, *21*, *22*, *23*, *24*. Фаза *С* соответствует векторам пазовых э. д. с. *5*, *6*, *7*, *8*, *17*, *18*, *19*, *20*.

На основании этих данных составлена схема обмотки, представленная на рис. 2-7,*а*. В соответствии со схемой порядок соединения сторон катушек примет следующий вид: фаза *А*: C_1—*1*—*16*—

$2—15—3—14—4—13—C_4$; фаза B: $C_2—9—24—10—23—11—22—12—21—C_5$; фаза C: $C_3—17—8—18—7—19—6—20—5—C_6$; а звезда э. д. с. всей обмотки будет иметь вид трех сосредоточенных групп (пучков) векторов (рис. 2-8,*а*), где векторы с номерами, отмеченные штрихом, являются развернутыми на 180° векторами звезды пазовых э. д. с. (рис. 2-6,*б*).

Результирующие геометрических сумм этих пучков являются полными векторами фаз. Они сдвинуты друг относительно друга

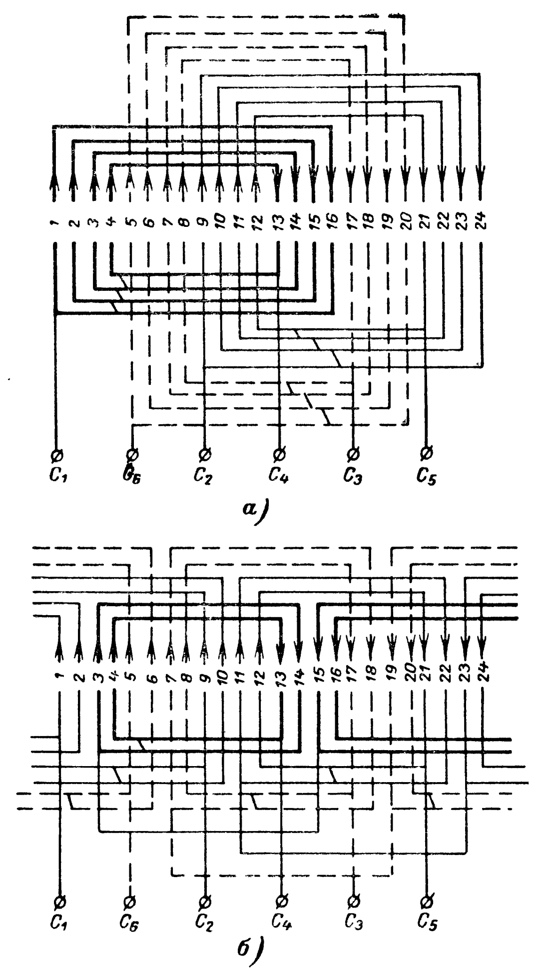


Рис. 2-7. Схема однослойной концентрической обмотки.

$2p=2$, $q=4$.

а — простая; *б* — «вразвалку».

на 120° и равны между собой по абсолютной величине (рис. 2-8,*б*). Это свидетельствует о том, что в результате соединения катушек обмотки образуется правильная симметричная трехфазная система.

2. Обмотка, выполненная «вразвалку».

Число катушек в полугруппе равно:

$$\frac{q}{2}=\frac{4}{2}=2.$$

Число полугрупп

$$A_0=2pm=2\cdot 1\cdot 3=6;$$

шаги катушек:

$$y_1=1+2q=1+2\cdot 4=9;$$

$$y_2=3+2q=3+2\cdot 4=11;$$

средний шаг обмотки равен

$$y_{\text{ср}}=\frac{y_1+y_2}{2}=\frac{9+11}{2}=10.$$

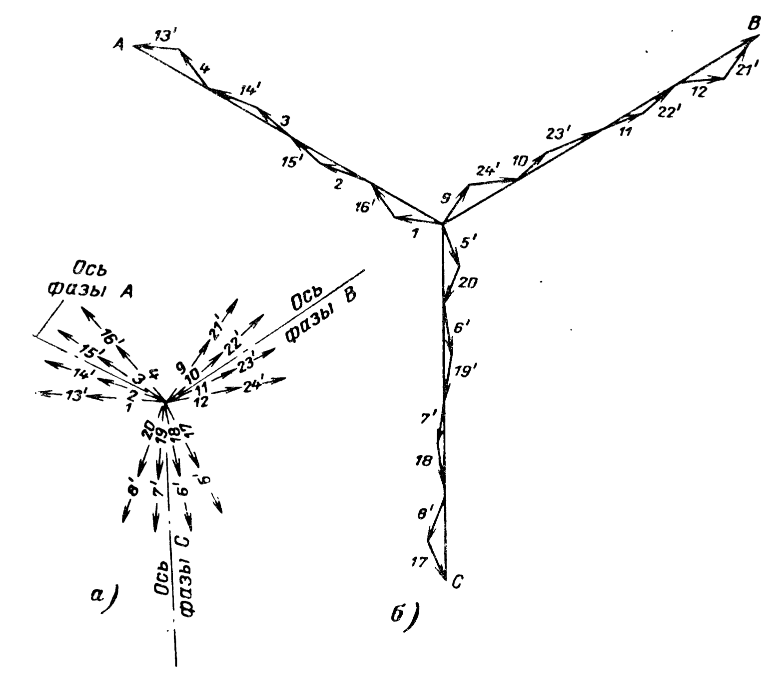


Рис. 2-8. Э. д. с. фаз обмотки.
$2p=2$; $z=24$; $q=4$.
а — звезда пазовых э. д. с.; *б* — диаграмма э. д. с. фаз.

Схема обмотки, выполненной вразвалку, дана на рис. 2-7,*б*. Из рисунка видно, что каждая катушечная группа, имеющая *q* последовательно соединенных катушек, разделена на две полугруппы

В соответствии со схемой на рис. 2-7,*б* ниже приводится порядок соединений сторон катушек обмотки, выполненной вразвалку. Фаза *А*: C_1—*1*—*16*—*2*—*15*—*3*—*15*—*4*—*13*—C_4; фаза *В*: C_2—*9*—*24*—*10*—*23*—*11*—*22*—*12*—*21*—C_5; фаза *С*: C_3—*17*—*8*—*18*—*7*—*19*—*6*—*20*—*6*—C_6.

Так как соединение сторон для обмотки, выполненной вразвалку, полностью совпадает с порядком соединения, выполненным для простой концентрической обмотки, то и звезда фазовых э. д. с. для схемы, выполненной вразвалку, полностью совпадает со звездой фазовых э. д. с., выполненной для схемы на рис. 2-7,*а*.

Отсюда можно сделать вывод, что обмотка, выполненная вразвалку, в электрическом и магнитном отношении эквивалентна простой концентрической обмотке. Однако в отличие от нее имеет меньший (с точки зрения технологической) средний шаг, расход меди, а также меньшие размеры лобовых дуг, но может быть выполнена только как трехплоскостная для любого числа пар полюсов.

2-4. ШАБЛОННЫЕ ОДНОСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ

В отличие от простых концентрических однослойных обмоток, а также от концентрических обмоток вразвалку, где шаги отдельных катушек различны, однослойные шаблонные обмотки могут быть выполнены с одинаковым шагом; в этом случае катушки этих обмоток имеют одинаковые размеры и форму, а следовательно, равное активное и реактивное сопротивление по фазам. Они чаще всего выполняются как всыпные и поэтому укладываются в открытые и полуоткрытые пазы электродвигателей. По своему исполнению шаблонные однослойные обмотки подразделяются на четыре группы:

1) простые равнокатушечные шаблонные обмотки;
2) равнокатушечные шаблонные обмотки, выполненные вразвалку;
3) обмотки с чередующимися шагами;
4) цепные обмотки.

Простые равнокатушечные шаблонные обмотки. На рис. 1-14,*а* дана схема катушечной однослойной обмотки с одинаковым шагом. Недостатком этой схемы является большое количество пересечений, что вызывает значительные технологические трудности, а также большие длины лобовых частей. Для устранения этих недостатков

катушки простых шаблонных обмоток выполняются в виде трапеций одинаковой формы и размеров. Такая конфигурация катушек обеспечивает укладку обмоток в двух плокостях, а также значительно уменьшает длины лобовых частей. На рис. 2-9 приведена полная развернутая схема простой шаблонной обмотки четырехполюсной машины с числом пазов на полюс и фазу $q=2$. За нача-

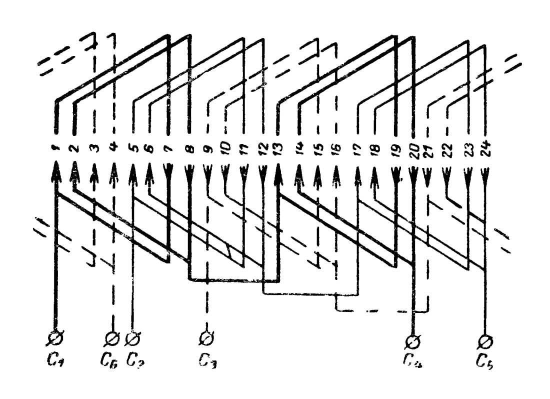


Рис. 2-9. Схема простой шаблонной равнокатушечной обмотки.
$2p=4$; $q=2$.

ло какой-либо фазы принимаем короткую сторону катушки: начала двух других фаз будут также выходить из коротких сторон катушек. Максимальное количество параллельных ветвей равно числу пар полюсов p. Обмотка может быть выполнена только с диаметральным шагом. Условия симметрии и выполнимости простых шаблонных обмоток такие же, как и для простых однослойных концентрических обмоток. В настоящее время они применяются очень редко из-за конструктивных затруднений и вытеснены двухслойными обмотками.

Равнокатушечные шаблонные обмотки, выполненные «вразвалку», отличаются от концентрических обмоток «вразвалку» формой катушек. Конфигурация катушек такая же, как и при простой шаблонной обмотке. Они выполняются только в том случае, если q равно четному числу.

На рис. 2-10 дана схема однослойной равнокатушечной шаблонной обмотки, выполненной «вразвалку».

Условия симметрии и выполнимости такие же, как и для концентрических обмоток «вразвалку».

Если число пазов на полюс и фазу нечетное и, следовательно, $q/2$ является числом дробным, то для выполнения шаблонной обмотки следует перейти к намотке однослойной шаблонной обмотки с чередующимися шагами.

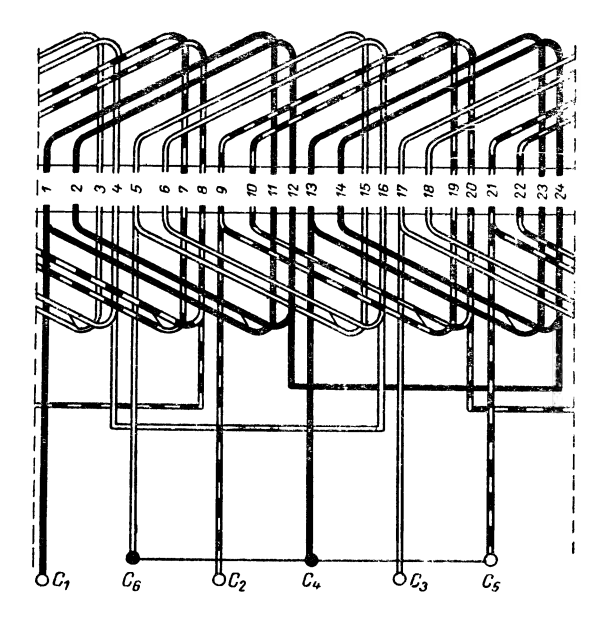


Рис. 2-10. Схема равнокатушечной шаблонной обмотки «вразвалку».
$2p=2$; $q=4$.

Шаблонные обмотки с чередующимися шагами по форме катушек соответствуют первым двум типам шаблонных обмоток, а по схеме соединения катушек являются концентрическими с различными шагами отдельных катушек. Они могут быть выполнены и «вразвалку». Как было сказано выше, шаблонные обмотки с чередующимися шагами очень удобны при дробном q.

Условия, выполнимости, число параллельных ветвей, определение шагов по пазам этих обмоток аналогичны однослойным катушечным концентрическим обмоткам.

Пример. Требуется составить схему катушечно-секционной обмотки с чередующимися шагами для двигателя, $z=36$, $2\ p=2$. Число пазов на полюс и фазу

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{36}{2\cdot 3}=6;\quad \frac{q}{2}=3.$$

По равенству (2-1) определим шаги отдельных катушек:

$$y_1=1+2q=1+2\cdot 6=13;\ y_2=3+2q=3+2\cdot 6=15;$$

$$y_3=5+2q=5+2\cdot 6=17.$$

На основании этих данных представлена схема на рис. 2-11.

Цепные обмотки раньше применялись довольно часто в турбогенераторах различных мощностей, а также в статорах машин малой мощности. В настоящее время обмотки турбогенераторов выполняются двухслойными. Однако при ремонте крупных машин свыше 500 *в* иност-

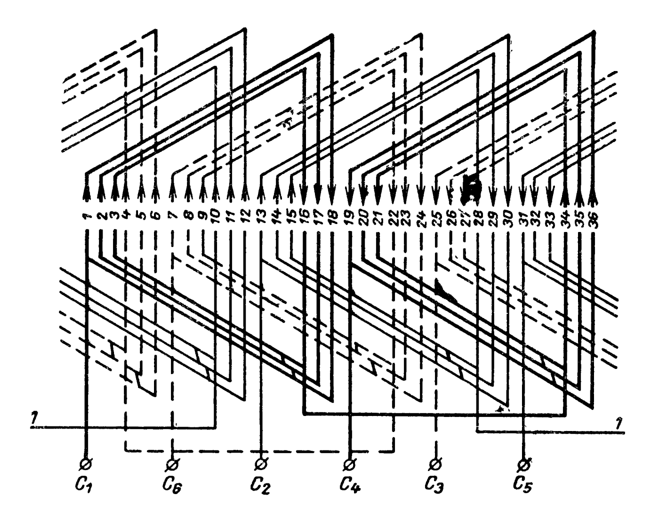


Рис. 2-11. Обмотка с чередующимися шагами «вразвалку».
$2\,p=2$; $q=6$.

ранных марок, где толщина пазовой изоляции, как правило, меньше, чем допустимая союзными нормами, часто приходится переходить с двухслойной обмотки на однослойную, дающую возможность увеличить толщину пазовой изоляции без увеличения плотности тока. Кроме

того, иногда переход на однослойную обмотку приводит к увеличению мощности. В качестве однослойной обмотки лучше всего применять цепную обмотку, при которой возможно сокращение шага, а также надежное крепление лобовых частей.

Как было сказано ранее, при «согласном» соединении трехфазных обмоток (простая катушечная обмотка, простая шаблонная обмотка) катушечная группа неза-

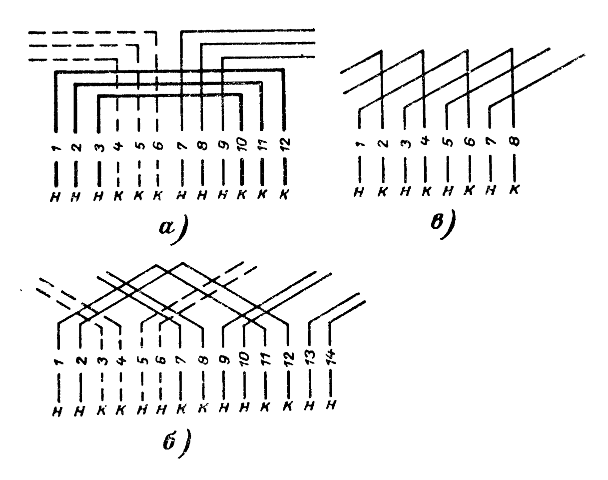


Рис. 2-12. Порядок чередования катушек.
а — концентрическая; *б* — шаблонная обмотка «вразвалку»; *в* — цепная обмотка.

висимо от типа обмотки образуется путем последовательного соединения q рядом лежащих катушек или $q/2$ рядом лежащих катушек при встречном соединении их в фазы (обмотка, выполненная «вразвалку»).

При этом в первом случае q начал чередуется с q концами (рис. 2-12, *а*), а во втором случае $q/2$ начал чередуется с $q/2$ концами, если q четное число (рис. 2-12, *б*) и $\frac{q-1}{2}$ начал чередуется с $\frac{q-1}{2}+1$ концами при q — нечетном числе.

В некоторых однослойных секционных обмотках одно начало чередуется с концом (рис. 2-12,*в*). Эти обмотки получили название цепных.

Эта особенность выполнения делает их более технологичными по сравнению с простыми шаблонными обмот-

ками. Катушки обмотки имеют такую же трапецеидальную форму, как и в простых шаблонных обмотках. Укладку катушек в пазы производят таким образом, чтобы короткая сторона катушки чередовалась с длинной. На рис. 2-13 дана схема цепной обмотки, из которой видно, что короткие стороны лежат в нечетных пазах и образуют начало катушек, а длинные стороны лежат в четных пазах и образуют конец катушек. Поскольку четные и нечетные пазы чередуются, то начала и концы катушек также чередуются.

Такое расположение катушек приводит к тому, что в случае «согласного» соединения катушечную группу образуют путем последовательного соединения катушек, расположенных через паз (рис. 2-13,*а*, *б*). При «встречном» соединении катушечная группа может быть образована рядом лежащими катушками (рис. 2-14,*а*). Цепная обмотка может быть выполнена только в том случае, если между сторонами, образующими катушку, будет расположено четное число пазов. Только в этом случае можно расположить равное число катушек с короткими и длинными сторонами. Это приводит к условию, что шаг по пазам должен быть нечетным. Следовательно, цепные обмотки в отличие от других типов обмоток могут выполняться только с нечетным шагом по пазам.

Исследование цепных обмоток проведем с помощью звезды пазовых э. д. с. на примере двигателя, имеющего $z=24$ паза, $2p=4$.

Число пазов на полюс и фазу равно $q=\frac{z}{2pm}=\frac{24}{2\cdot2\cdot3}=$ $=2$.

Обмотка соединена «согласно». На рис. 2-13,*а* дана схема цепной обмотки, катушечные группы которой соединены «согласно».

Звезда пазовых э. д. с. дана на рис. 2-13,*в* — *д*.

Соединения сторон катушек обмотки по фазам проведены на основании схемы (рис. 2-13,*а*). Пазовые э. д. с., развернутые на 180°, при определении фазных э. д. с. обозначаются знаком штрих (′) имеют следующий вид:

$$C_1—1—6'—3—8'—13—18'—15—20'—C_4;$$

$$C_2—9—14'—11—16'—21—2'—23—4'—C_5;$$

$$C_3—5—10'—7—\overset{c}{12'}—17—22'—19—24'—C_6.$$

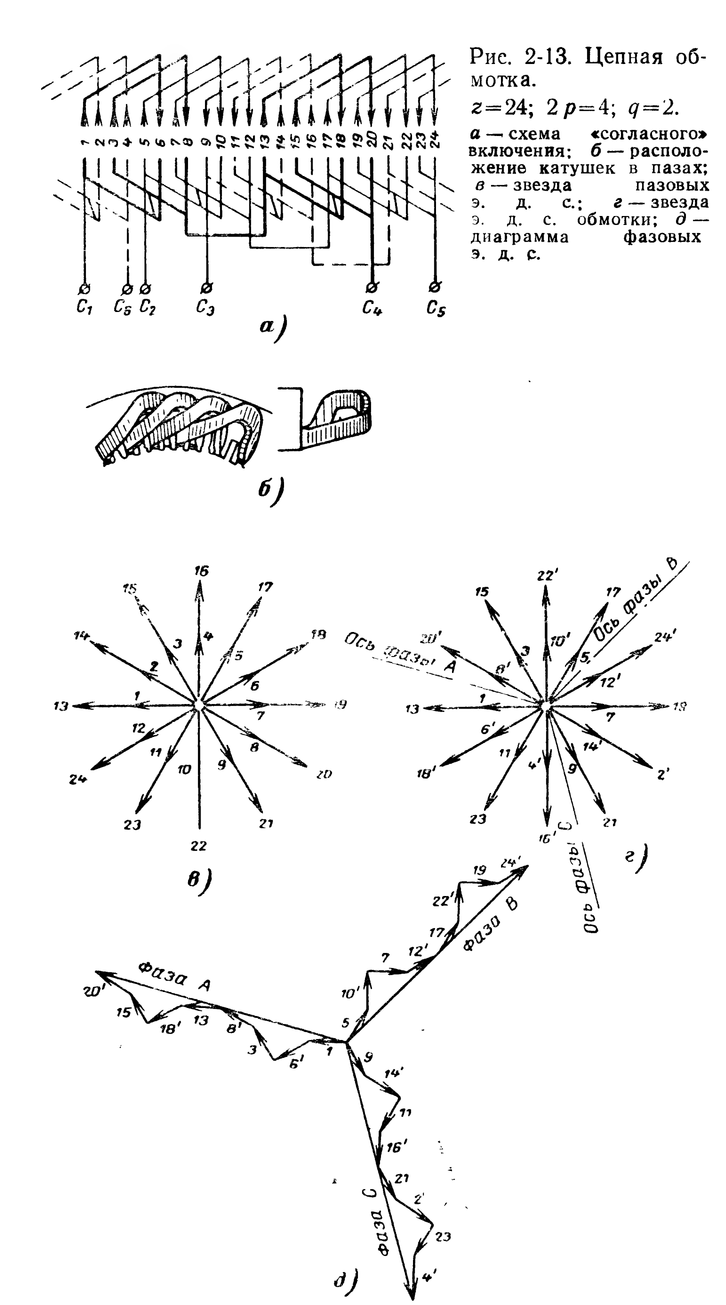


Рис. 2-13. Цепная обмотка.

$z=24$; $2p=4$; $q=2$.

а — схема «согласного» включения; **б** — расположение катушек в пазах; **в** — звезда пазовых э. д. с.; **г** — звезда э. д. с. обмотки; **д** — диаграмма фазовых э. д. с.

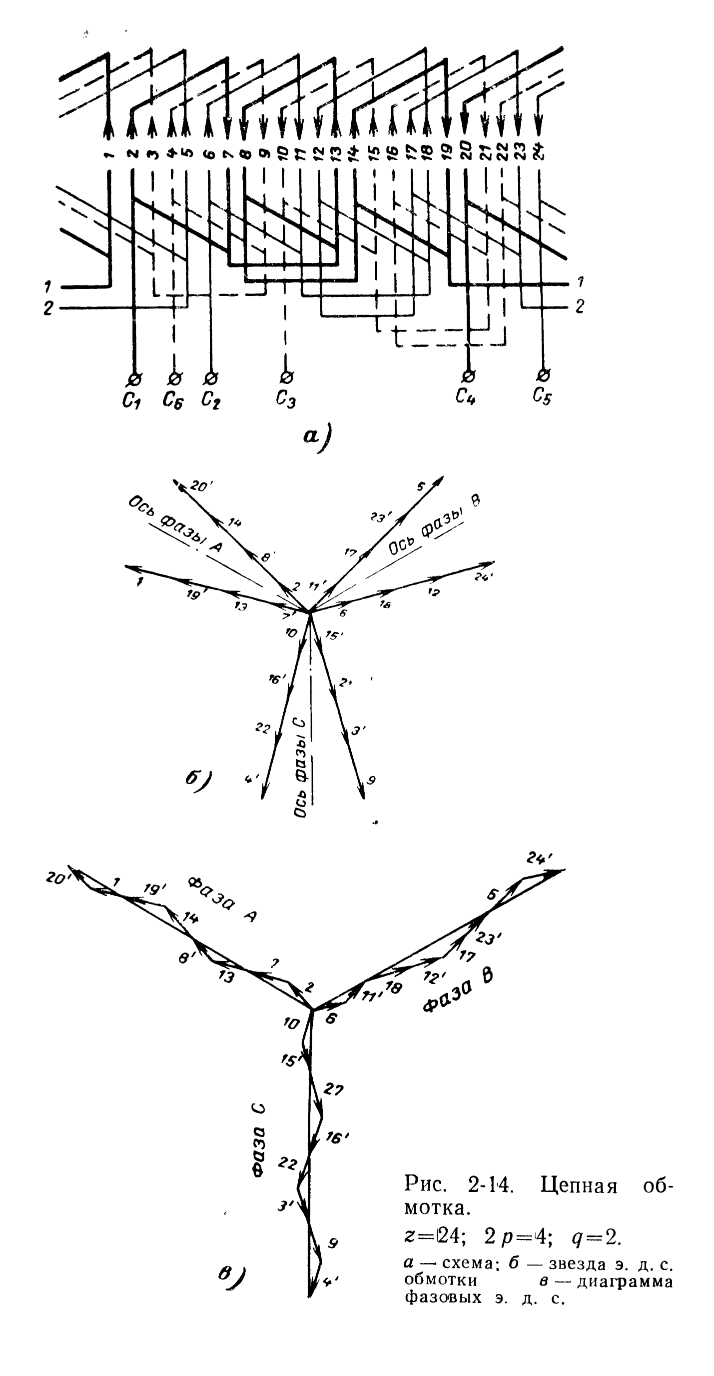


Рис. 2-14. Цепная обмотка.

$z=24$; $2p=4$; $q=2$.

а — схема; *б* — звезда э. д. с. обмотки *в* — диаграмма фазовых э. д. с.

На рис. 2-13,*д* дана диаграмма фазных э. д. с., построенная в соответствии с данными таблицы и диаграммы пазовых э. д. с. (рис. 2-13,*в*).

Если принять во внимание табличный порядок соединения катушек обмотки друг с другом, то звезда э. д. с. обмотки (рис. 2-13,*г*) будет иметь вид трех сосредоточенных групп, результирующие суммы которых равны между собой и сдвинуты друг относительно друга на 120°.

Это свидетельствует о том, что в результате такого соединения образуется симметричная обмотка.

Соединение катушечных групп «встречно» («вразвалку»).

На рис. 2-14,*а* дана схема цепной обмотки того же двигателя, соединенного «встречно», «вразвалку».

Порядок соединения сторон катушек обмотки примет следующий вид:

$$C_1—1—6'—12—7'—13—18'—24—19'—C_4;$$

$$C_2—5—10'—16—11'—17—22'—4—23'—C_5;$$

$$C_3—9—17'—20—15'—21—2'—8—3'—C_6.$$

На рис. 2-14,*в* дана диаграмма фазных э. д. с., построенная по данным таблицы соединения сторон катушек обмотки и диаграммы пазовых э. д. с. (рис. 2-13,*в*). Из диаграммы фазных э. д. с. видно, что и в этом случае э. д. с. трех фаз равны между собой и сдвинуты относительно друг друга по фазе на угол 120°. Следовательно, эта обмотка является также симметричной.

Однако в отличие от рассмотренных ранее однослойных обмоток, где величина наведенной э. д. с. не зависела от способа соединения катушечных групп в фазы («согласно» или «встречно»), в цепных обмотках величина наведенной э. д. с. в значительной мере зависит от способа соединения. Так, например, при «согласном» соединении катушечных групп величина наведенных фазовых э. д. с. значительно меньше, чем при соединении их «встречно» (рис. 2-14,*в*). Это вызвано тем, что при «согласном» соединении катушечные группы образуются катушками, лежащими через паз, и, следовательно, обмотка более резко смещается в магнитном поле, чем при соединении их «встречно». Поэтому геометрическая сумма пазовых э. д. с. в первом случае меньше, чем во втором. Цепные обмотки следует выполнять «вразвалку»,

так как в этом случае они приближаются к обмоткам со сплошными фазными зонами. Их можно соединять последовательно, параллельно и смешанно. Максимальное число параллельных ветвей при нечетном числе пазов на полюс и фазу может быть равным числу пар полюсов, так как на каждой полюсной паре повторяется одно и то же расположение всех фаз в магнитном поле.

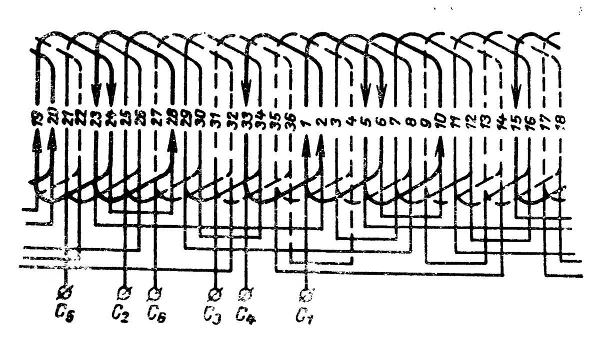


Рис. 2-15. Цепная обмотка.

$2p=8;\ q=1\frac{1}{2};\ z=36.$

При четном числе пазов на полюс и фазу максимальное число параллельных ветвей в случае соединения катушечных групп «вразвалку» может быть выполнено равным числу полюсов, т. е. $2p$.

Цепные обмотки могут выполняться с дробным числом пазов на полюс и фазу. На рис. 2-15 дана схема цепной обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу.

Возможное число параллельных ветвей равно частному от деления числа пар полюсов на знаменатель дробности d.

Если предположить, что число пазов на полюс и фазу $q=1\frac{1}{4}$, а число полюсов равно $2p=16$, то максимальное число параллельных ветвей может быть равно:

$$a_2=\frac{p}{d}=\frac{8}{4}=2.$$

Шаг цепной обмотки. Обмотки выполняются с диаметральным, укороченным и удлиненным шагом. Обмот-

ка с диаметральным шагом может быть выполнена только в том случае, если частное от деления числа пазов на число полюсов будет нечетным:

$$\frac{z}{2p} = \text{нечетному числу.}$$

Например: двигатель, имеющий 36 пазов, может быть выполнен с диаметральным шагом только с четырьмя полюсами, так как

$$\frac{z}{2p} = \frac{36}{4} = 9.$$

Укорочение шага цепных обмоток следует производить таким образом, чтобы после укорочения шаг был выражен нечетным числом. Отсюда можно установить следующее правило. В случае, если диаметральный шаг выражается четным числом, укоротить его следует на нечетное число пазов. При этом коэффициент укорочения β должен быть в пределах 0,8.

Пример.

$$z = 48;\ 2p = 4;\ y_0 = \tau = \frac{z}{2p} = \frac{48}{4} = 12.$$

Обмотка с таким шагом не может быть выполнена, поэтому необходимо укоротить шаг на нечетное число пазов: 1, 3, 5.

При укорочении на один паз

$$\beta = \frac{y}{y_0} = \frac{12-1}{12} = 0{,}965.$$

При укорочении на три паза

$$\beta = \frac{12-3}{12} = 0{,}75.$$

При укорочении на пять пазов

$$\beta = \frac{12-5}{12} = 0{,}584.$$

Приемлемо будет укорочение на один и три паза. В тех случаях, где укорочение шага на три паза приводит к результатам, значительно отличающимся от принятой величины 0,8, укорочение производится только на один паз.

Укорочение на четное число пазов возможно в том случае, если диаметральный шаг получится нечетным.

Пример.

$$z = 36;\ 2p = 4;\ \tau = y_0 = \frac{36}{4} = 9.$$

Произведем укорочение на два паза, тогда

$$\beta = \frac{y}{y_0} = \frac{9-2}{9} = \frac{7}{9} = 0{,}77.$$ Это вполне приемлемо.

Условия выполнимости цепных обмоток. 1) Общее число катушек статора $A_{к.с}$ равно половине числа пазов статора, т. е. число пазов статора должно быть числом четным:

$$A_{к.с} = \frac{z}{2} \text{ — целое число.}$$

2) Как всякая симметричная обмотка, так и цепная может быть выполнена в том случае, если частное от деления число пазов z на число фаз m равно целому числу, т. е. z/m — целое число. Так как в каждой фазе должно быть равное и четное число пазов, то выполнение однослойных цепных обмоток возможно в случае, если частное от деления числа пазов на $2m$ равно целому числу:

$$\frac{z}{2m} = \frac{z}{6} = \text{целому числу.}$$

3) Условия выполнимости параллельных ветвей:

$$\frac{2p}{a_2} = \text{целому числу.}$$

4) Шаг обмотки должен быть только нечетным.

5) Обмотка с диаметральным шагом может быть выполнена только в том случае, если полюсный шаг τ получается нечетным.

Лобовые части соседних катушек цепных обмоток всегда перекрещиваются (рис. 2-13,*б*) и образуют плетеную корзинку. Вследствие этого все одноименные стороны катушек, например левые, выходят из пазов и образуют нижнюю недоступную поверхность лобовых частей; правые стороны этих катушек образуют наружную поверхность лобовых частей. Такая конструкция

обмотки затрудняет частичный ремонт (замена пробитой катушки), так как выемка поврежденной катушки связана с подъемом по шагу неповрежденных катушек.

Глава третья

ДВУХСЛОЙНЫЕ ПЕТЛЕВЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

3-1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В двухслойных обмотках машин переменного тока катушки занимают (в отличие от однослойных) половину паза. В каждом пазу лежат стороны двух разных катушек. Одна сторона катушки расположена в верхней половине паза (рис. 3-1,*а*), другая сторона расположена на расстоянии шага обмотки в нижней части паза. Катушечная группа образуется из нескольких рядом лежащих катушек. Число катушек в двухслойной обмотке равно числу пазов. Это дает возможность выполнить двухслойные обмотки с четным и нечетным числом пазов в машине.

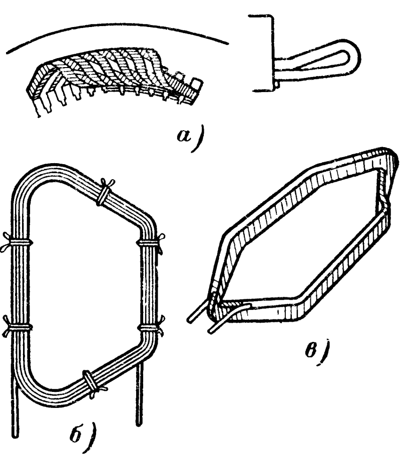


Рис. 3-1. Двухслойная обмотка.
а — расположение катушек в пазу; *б* — мягкая катушка; *в* — жесткая катушка.

Двухслойные обмотки нашли широкое применение в статорах электродвигателей различных мощностей, гидро- и турбогенераторах, а также в роторах асинхронных двигателей с контактными кольцами. Двухслойные обмотки могут быть выполнены при значительно меньшем числе ограничений, чем однослойные. Они могут быть петлевыми (рис. 1-17,*а*) и волновыми; с числом пазом на полюс и фазу целым и дробным; степень дробности может быть любой, возможно применение несимметричных обмоток.

Катушки двухслойной обмотки могут выполняться с диаметральным, укороченным и удлиненным шагом.

Практически применяется укороченный шаг, так как при этом экономнее расходуется медь и улучшается форма кривой э. д. с. Диаметральный шаг, как правило, практически не применяется. Удлиненный шаг применяется для многоскоростных двигателей. Применение этих обмоток позволяет упростить и удешевить процесс изготовления электрических машин, так как катушки двухслойных обмоток выполняются все одинаковые. Это дает возможность механизировать процесс изготовления катушек.

В дальнейшем при изложении материала, если нет дополнительных пояснений, относящихся к роторным обмоткам, всегда будем иметь в виду то, что речь идет об обмотках статоров.

3-2. ДВУХСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ С ЦЕЛЫМ ЧИСЛОМ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Обмотки с диаметральным шагом. Двухслойные обмотки с диаметральным шагом можно представить себе как совокупность двух однослойных обмоток со сплошными фазными зонами, расположенными в одном статоре.

На рис. 3-2 дана схема двухслойной обмотки двигателя с числом пазов $z=24$, числом полюсов $2p=4$ и числом пазов на полюс и фазу

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{24}{2\cdot 2\cdot 3}=2.$$

Шаг обмотки по пазам равен $y_0=\tau=\frac{24}{4}=6$ (из 1-го в 7-й).

Как видно из рис. 3-2, *а*, первая катушечная группа фазы A расположена в пазах *1*, *2*, *7* и *8*. Первая катушечная группа фазы B должна быть сдвинута относительно фазы A на $\frac{2}{3}\tau$, т. е. на расстояние $\frac{2}{3}\cdot 6=4$, и, следовательно, будет расположена в пазах $1+4=5$ и $2+4=6$. Нижние стороны разместятся на расстоянии шага, а именно $5+6=11$ и $6+6=12$. Соответственно фаза C будет распологаться в пазах *3*, *4* и *9*, *10*.

Вторая катушечная группа фазы A: *13—19*, *14—20*, фазы B: *17—23*, *18—24*, фазы C: *15—21*, *16—22*. Схему двухслойной обмотки на рис. 3-2,*а* можно разбить на две однослойные обмотки, представленные на схемах рис. 3-2,*б* и *в*, последние же по существу ничем не отли-

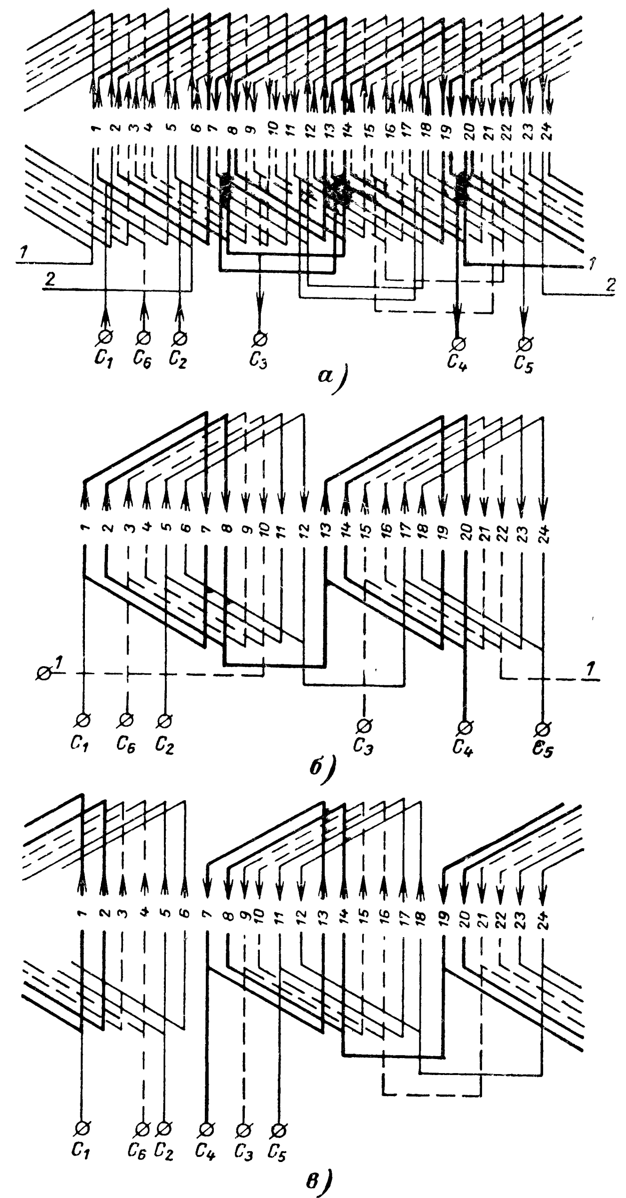


Рис. 3-2. Двухслойная обмотка.

$2p=4$; $y_0=\tau=6$; $z=24$.

а — схема обмотки; *б* — схема первого слоя; *в* — схема второго слоя.

чаются от схемы рис. 2-9, т. е. двухслойная обмотка представляет собой две однослойные шаблонные обмотки со сплошными фазными зонами, расположенными в одном статоре.

Звезда пазовых э. д. с. двухслойных обмоток, показывающая положение отдельных пазов в магнитном поле, характерна тем, что в каждом пазу находятся две катушечные стороны, поэтому звезда пазов также показывает положение в магнитном поле верхних и нижних катушечных сторон, т. е. верхнего и нижнего слоя. Достаточно рассмотреть только один из двух слоев, чтобы судить о всей обмотке в целом. Однако в двухслойных обмотках в одном пазу могут находиться стороны, принадлежащие различным фазам. Поэтому для построения полной звезды пазовых э. д. с., на основании которой можно судить о степени симметричности и форме кривой фазной э. д. с., для данной схемы строят звезду пазовых э. д. с. для каждого слоя в отдельности. При этом в отличие от однослойных обмоток, где каждому пазу соответствует один вектор, в двухслойных обмотках каждому пазу соответствуют два (по количеству слоев) одноименных вектора.



Рис. 3-3. Э. д. с. паза двухслойной обмотки.

а — э. д. с. первого слоя; *б* — э. д. с. второго слоя.

Так, например, э. д. с. паза *1* слагаем из э. д. с., индуктируемой в верхнем слое (обозначена *1*) и в нижнем (*1'*). Вектор *1'* получен поворотом вектора *1* на 180° (рис. 3-3,*а*).

Такая замена вполне допустима, так как для определения э. д. с. паза надо из э. д. с. *1* вычесть э. д. с. *1'*, что соответствует сумме э. д. с. первой и второй плоскости. Рассмотрим звезды пазовых э. д. с. двухслойной обмотки двигателя, имеющего 24 паза и число полюсов $2p=4$ (рис. 3-2,*а*).

Звезда пазовых э. д. с. этой обмотки будет состоять из 24 векторов, сдвинутых, как и в однослойной обмотке, на угол, равный $60/q$ (рис. 3-4,*а*), и 24 векторов второй плоскости. Направления э. д. с. пазов второй плоскости повернуты по отношению к э. д. с. первой плоскости на 180° (рис. 3-4,*б*).

Для получения э. д. с. фазы обмотки необходимо сложить векторы э. д. с. со штрихами и без штрихов.

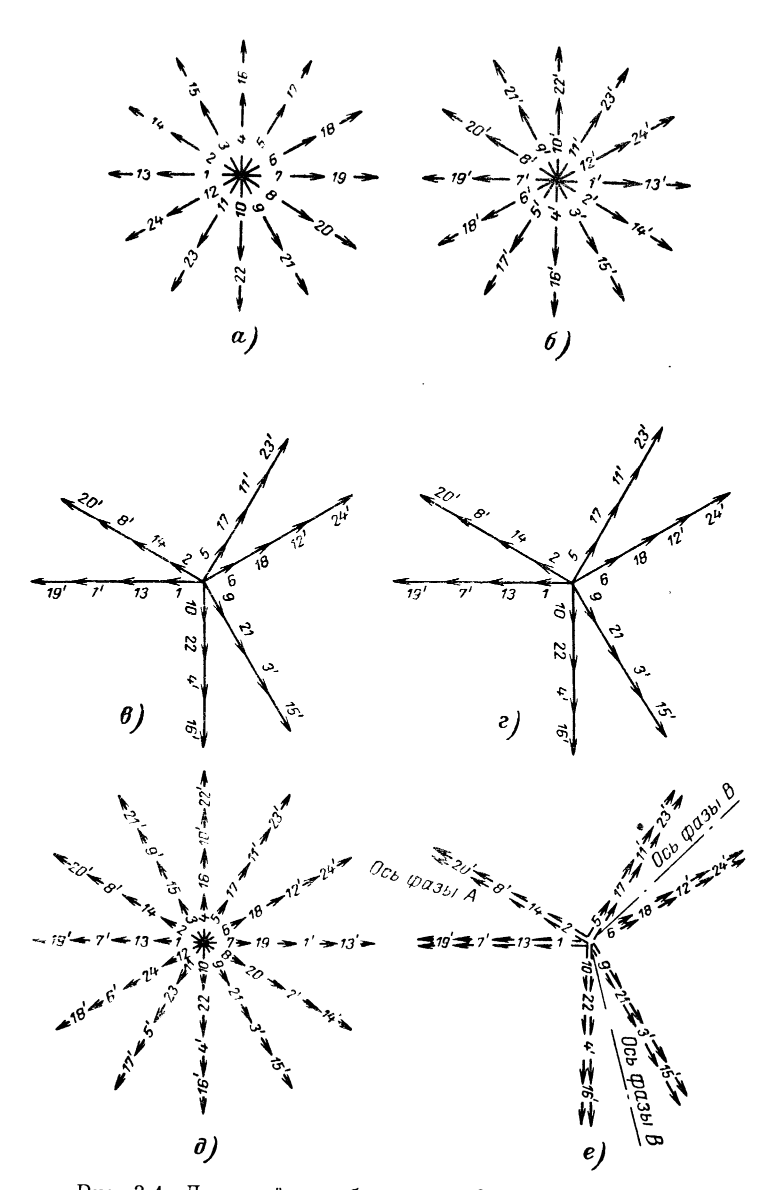


Рис. 3-4. Двухслойная обмотка. $z=24$; $2p=4$.

а — звезда пазовых э. д. с. первого слоя; *б* — то же второго слоя; *в* — звезда э. д. с. обмотки первого слоя; *г* — то же второго слоя; *д* — полная звезда пазовых э. д. с. всей обмотки; *е* — звезда э. д. с. обмотки.

Для этого изобразим соединения сторон по фазам:

Фаза *A*	Фаза *B*	Фаза *C*
C_1 → *1 — 7′*	C_2 → *5 — 11′*	C_3 → *9 — 15′*
↙	↙	↙
2 — 8′ →	*6 — 12′* →	*10 — 16′* →
← *7 — 13′*	← *11 — 17′*	← *15 — 21′*
↗	↗	↗
8 — 14′ ←	*12 — 18′* ←	*16 — 22′* ←
→ *13 — 19′*	→ *17 — 23′*	→ *21 — 3′*
↙	↙	↙
14 — 20′ →	*18 — 24′* →	*22 — 4′* →
C_4 ← *19 — 1′*	C_5 ← *23 — 5′*	C_6 ← *3 — 9′*
↗	↗	↗
20 — 2′ ←	*24 — 6′* ←	*4 — 10′* ←

По этим данным построена звезда э. д. с. всей обмотки. Для ее построения необходимо из звезды пазовых э. д. с. (рис. 3-4, *а*) в фазе *А* от восьми векторов пазовых э. д. с. *1—2—13—14—7′—8′—19′—20′* вычесть восемь векторов пазовых э. д. с. *7—8—19—20—1′—2′—13′—14′* или прибавить их с обратным знаком. Получим следующие обозначения: для фазы *А 7′—8′—19′—20′—1—2—13—14*; для фазы *В 5—6—17—18—11′—12′—23′—24′—5—6——17—18—11′—12′—23′—24′*; для фазы *С 9—10—21——22—3′—4′—15′—16′—9—10—21—22—3′—4′—15′—16′*.

На рис. 3-4,*е* дана звезда э. д. с. обмотки. Как видно из рисунка, звезда э. д. с. обмотки состоит из пучка векторов, геометрическая сумма которых дает правильную трехфазную систему.

Двухслойные обмотки с укороченным шагом. На рис. 3-5 представлена схема двухслойной обмотки двигателя с укороченным шагом.

$$2p = 4;\quad z = 24;\quad q = 2;\quad y = \frac{5}{6}\tau;\quad \beta = \frac{y}{\tau} = \frac{5}{6} = 0{,}83.$$

Порядок соединения сторон катушек этой обмотки представлен в следующем виде:

Фаза *A*	Фаза *B*	Фаза *C*
C_1 → *1 — 6′*	C_2 → *5 — 10′*	C_3 → *9 — 14′*
↙	↙	↙
2 — 7′ →	*6 — 11′* →	*10 — 15′* →
← *7 — 12′*	← *11 — 16′*	← *15 — 20′*
↗	↗	↗
8 — 13′ ←	*12 — 17′* ←	*16 — 21′* ←
→ *13 — 18′*	→ *17 — 22′*	→ *21 — 2′*
↙	↙	↙
14 — 19′ →	*18 — 23′* →	*22 — 31′* →
C_4 ← *19 — 24′*	C_5 ← *23 — 4′*	C_6 ← *3 — 8′*
↗	↗	↙
20 — 1′ ←	*24 — 5′* ←	*4 — 9′* ←

Звезда пазовых э. д. с. обмотки с укороченным шагом имеет по 24 луча в первой и во второй плоскостях, т. е. столько же, сколько и в ранее рассмотренной обмотке с полным шагом. Из сравнения звезд пазовых э. д. с.

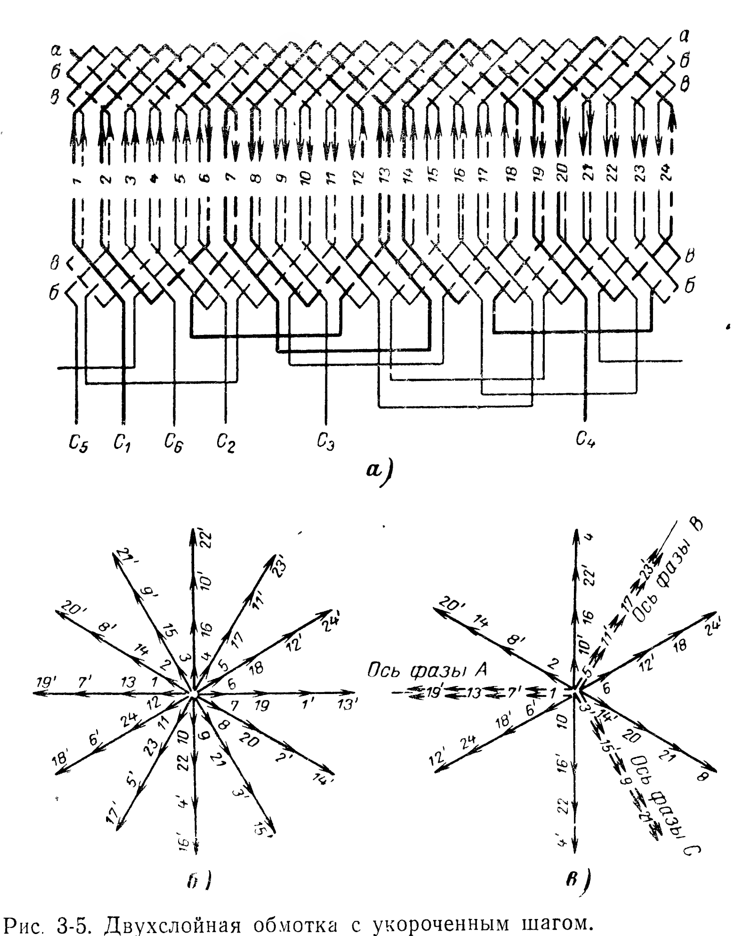


Рис. 3-5. Двухслойная обмотка с укороченным шагом.
$z=24$; $2p=4$; $y=0{,}8\tau$; $q=2$.

а — схема; *б* — звезда э. д. с. пазов; *в* — звезда э. д. с. обмотки.

с полным шагом (рис. 3-4,*д*) с укороченным (рис. 3-5,*б*) следует, что они вполне идентичны. Если сравнить звезды э. д. с. обмотки, видно, что при диаметральном шаге обмотки зоны лучей каждой фазы резко ограниче-

ны от зон соседних фаз (рис. 3-4,*е*). В рассматриваемом случае имеет место взаимное переплетение лучей соседних фаз, которое возрастает с увеличением укорочения шага (рис. 3-5,*в*), что улучшает форму кривой э. д. с.

Из звезды э. д. с. обмотки видно, что геометрические суммы векторов э. д. с. каждой фазы равны между собой, а также сдвинуты на угол 120°, поэтому и в данном случае образуется симметричная трехфазная система.

3-3. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВУХСЛОЙНЫХ ОБМОТОК НА ФОРМУ КРИВОЙ Э. Д. С.

Как было отмечено ранее, общим требованием, предъявляемым к генераторам и двигателям переменного тока, является необходимость приближения кривой напряжения, индуктированного в обмотке, к синусоиде.

Если предположить, что в пазу во всех проводниках индуктируется одинаковое напряжение, тогда характер его изменения будет совпадать с характером изменения магнитного поля.

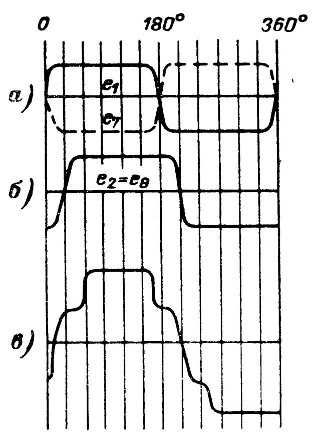


Рис. 3-6. Кривые э. д. с. обмотки.

$z=24$; $2p=4$.

а — кривая э. д. с. пазов *1* и *7*; *б* — то же пазов *2* и *8*; *в* — суммарная кривая э. д. с. катушечной группы $q=2$.

При изменении магнитного поля по синусоиде напряжение изменяется также синусоидально. Однако при несинусоидальной кривой поля можно путем целесообразного выбора обмотки получить кривую напряжения в фазе, приближающуюся к синусоиде, так как на ее форму оказывают влияние различные факторы: шаг обмотки (диаметральный или укороченный), число пазов на полюс и фазу, а также степень дробности при дробном числе пазов на полюс и фазу.

Для определения влияния этих факторов при рассмотрении двухслойной обмотки построим кривую напряжения для каждого случая в отдельности. Следует отметить, что указанные факторы также влияют и на однослойные обмотки.

Влияние числа пазов на полюс и фазу. Предположим, что кривая магнитного поля имеет форму, изображенную на рис. 1-8, которая значительно отличается от синусоиды. Тогда в каждом пазу будет индуктироваться э. д. с., имеющая такую же форму, а следовательно, эта кривая в определенном масштабе является кривой пазовых э. д. с.

Рассмотрим форму кривой индуктированного напряжения двухслойной обмотки четырехполюсного двигателя. Для этой цели вос-

пользуемся звездой пазовых э. д. с. (рис. 3-4) и схемой соединений двухслойной обмотки (рис. 3-2,*а*). На рис. 3-6,*а* представлено изменение э. д. с. в пазу *1* и *7*, которое имеет форму магнитного поля. (В действительности в пазу *7* э. д. с. меняется по пунктирной кривой, так как паз *7* соединен с пазом *1* «встречно», это равносильно повороту кривой на 180°.) В пазу *2* и *8* наводится э. д. с., по форме такая же, как и в пазах *1* и *7*. Однако она должна быть сдвинута на 30° относительно кривой пазов *1—7* (рис. 3-6,*б*).

Суммарная кривая катушечной группы ($q=2$) имеет ступенчатую форму (рис. 3-6,*в*). Таким образом, она ближе по форме к синусоиде, чем форма кривой поля (рис. 3-6,*а*).

Влияние укорочения шага. Для определения влияния укорочения шага на форму кривой индуктированного напряжения рассмотрим кривую напряжения той же обмотки, но с шагом, равным $\frac{5}{6}\tau$, т. е. с укорочением на 30°. На рис. 3-5,*а* дана схема той же обмотки с укороченным шагом. Из схемы видно, что в отличие от обмоток с диаметральным шагом, где верхний и нижний слои обмотки принадлежат одноименным фазам (обмотки со сплошными фазными зонами), в обмотках с укороченным шагом это не соблюдается. В некоторых пазах встречаются стороны катушек, принадлежащие различным фазам.

Для исследования формы кривой катушечных групп построим четыре графика (по числу катушечных сторон в одной катушечной группе), сходных с характером кривой магнитного поля (рис. 1-8), сдвинутых относительно друг друга на угол, определяемый из звезды векторов пазовых э. д. с. Первая катушечная группа расположена в пазах *1*, *2*, *6*, *7* (рис. 3-5,*а*). На рис. 3-7*а* дана кривая изменения э. д. с., индуктируемой в пазу *1* (допустим, что в рассматриваемый момент времени паз *1* находится на нейтрали и, следовательно, э. д. с. равна нулю). В этот же момент времени в пазу *6* э. д. с. имеет некоторую величину, так как она отстает на 30° от положения нейтрали (вектор *6*, рис. 3-5,*б*). Как видно из рис. 3-7,*б* направление э. д. с. паза *6* условно повернуто на 180°, так как стороны катушек по шагу соединены «встречно», т. е. конец с концом. Электродвижущая сила паза *2* сдвинута относи-

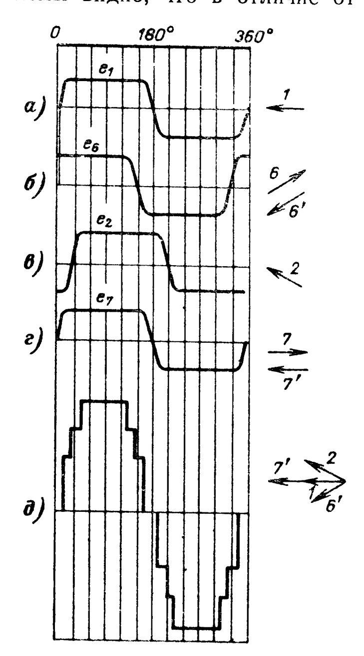


Рис. 3-7. Кривые э. д. с. обмотки с укороченным шагом. $z=24$; $2p=4$;

$$y=\frac{5}{6}\tau.$$

а — кривая э. д. с. паза *1*; *б* — то же паза *6*; *в* — то же паза *2*; *г* — то же паза *7*; *д* — суммарная кривая э. д. с. катушечной группы.

тельно э. д. с. паза *1* согласно звезде пазовых э. д. с. на 30° (рис 3-5,*б*). Кривая изменения э. д. с. этого паза с учетом сдвига по фазе дана на рис. 3-7,*в*. Аналогично строим кривую изменения э. д. с. в пазу *7* (находится на нейтрали), совпадающую с кривой паза *1*.

Результирующая кривая (рис. 3-7,*д*) имеет три ступени, и она более сходна с синусоидой, чем кривая на рис. 3-6,*в*, следователь-

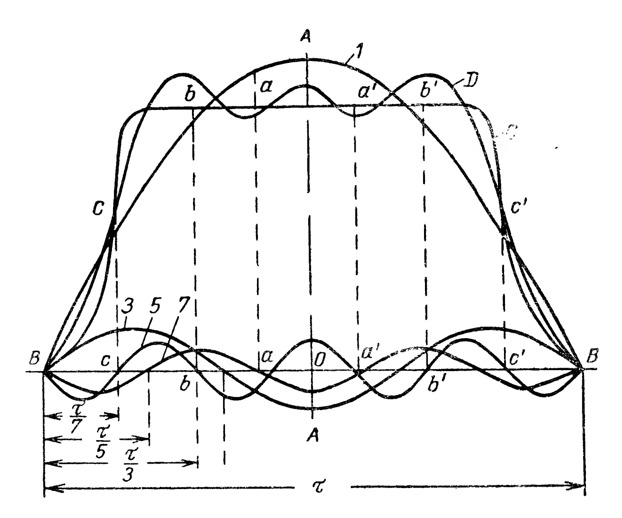


Рис. 3-8. Кривая поля синхронной машины.

но, обмотка с укорочением шага с точки зрения формы кривой более благоприятна, чем обмотка с диаметральным шагом, так как ее график более приближен к синусоиде.

Для остальных катушечных групп получим такие же кривые. В связи с тем, что формы кривых и сдвиг по времени э. д. с. всех катушечных групп одной фазы совпадают, катушечные группы могут включаться не только последовательно, но и параллельно.

Подавление высших гармоник в кривых напряжения путем укорочения шага обмотки. Ранее было показано, что укорочение шага по пазам обмотки статора ведет к увеличению ступеней кривой напряжения, т. е. приближаем форму кривой к синусоиде. Можно показать, что с помощью укорочения шага подавляются высшие гармоники в кривых напряжения.

В теории синхронных машин доказывается, что распределение магнитного поля ротора практически будет соответствовать действительному, если кривую поля *C* заменить суммой синусоидальных кривых *1*, *3*, *5*, *7* (рис. 3-8).

При этом полюсный шаг поля *1* равен полюсному шагу τ полюса ротора. Полюсные шаги полей *3*, *5* и *7* в 3, 5 и 7 раз меньше полюсного шага *1*.

Синусоидальные кривые *1*, *3*, *5* и *7* называются гармоническими составляющими или гармониками поля ротора.

Синусоиду *1* называют главной, основной или первой гармоникой, синусоиду *3* — третьей, синусоиду *5* — пятой, синусоиду *7* — седьмой гармоникой.

Складывая гармоники *1*, *3*, *5* и *7*, получаем кривую *D*, близкую к кривой *C*. Для бо́льшего совпадения этих кривых необходимо взять еще целый ряд гармоник с более мелким шагом. Отсюда можно сделать вывод: если бы удалось подавить высшие гармоники *3*, *5*, *7*, тогда кривая поля была бы синусоидальной, так как остается только гармоника *1*. Однако пока нет средства для подавления всех высших гармоник кривой поля.

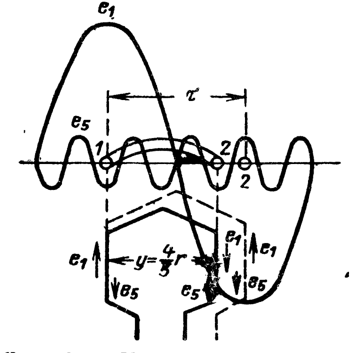


Рис. 3-9. Кривая напряжений первой гармоники e_1 и пятой e_5.

Кривая индуктированного напряжения, которая копирует кривую поля, также может быть разложна на гармонические составляющие. Они-то и могут быть уничтожены с помощью сокращения шага. На рис. 3-9 дана кривая напряжения 1-й и 5-й гармоник. Как видно из рисунка, если обмотка выполнена с диаметральным шагом $y_0=\tau$, то э. д. с. пятой гармоники, которые наводятся в сторонах *1* и *2*, должны складываться, так как их направления в сторонах витка противоположны, а стороны витка соединены «встречно».

При сокращении шага на 4/5 τ амплитуды синусоид пятой гармоники в сторонах витка направлены в одну сторону, при соединении сторон «встречно» их сумма равна нулю.

Аналогично можно получить полное подавление 7-й гармоники, если шаг обмотки будет укорочен на $\frac{6}{7}\tau$. Из теории машин известно, что при соединении фаз звездой или треугольником 3-я и кратные трем гармоники в линейных напряжениях отсутствуют.

Поэтому наибольший интерес представляет возможность сильного ослабления или полного подавления гармоник 5-го и 7-го порядка, для этого сокращение шага берут в пределах от 4/5 до $\frac{6}{7}\tau$, т. е. $y=0{,}8-0{,}86\tau$.

Как известно, наведенная э. д. с. в обмотках с укороченным шагом меньше, чем с диаметральным, при том же количестве витков в фазе. При укорочении, которое обычно применяется в двухслойных обмотках ($y\approx 0{,}8\ \tau$), уменьшение э. д. с. достигает порядка 5% по сравнению с диаметральным шагом. Для того чтобы наведенная э. д. с. была равной э. д. с. при диаметральном шаге, число витков должно быть увеличено примерно на 5%. При укорочении шага длина лобовых частей уменьшается так, что это с точки зрения расхода меди полностью компенсирует увеличение числа витков и даже дает экономию меди 10—15%. В табл. 3-1 приводится

рекомендуемая степень укорочения шага в зависимости от числа пазов на полюс и фазу.

Таблица 3-1

Число пазов на полюс и фазу q	Шаг обмотки
2	Из 1-го в 6-й
3	Из 1-го в 8-й
4	Из 1-го в 11-й
5	Из 1-го в 13-й
6	Из 1-го в 16-й
7	Из 1-го в 18-й

3-4. ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ ФАЗНОЙ ЗОНЫ ОТ МЕТОДА СОЕДИНЕНИЯ КАТУШЕЧНЫХ ГРУПП

В отличие от однослойных обмоток, где сторона катушечных групп независимо от вида соединения («согласного» или «встречного») всегда занимает 60-градусную фазную зону, в двухслойных обмотках это соблюдается только при «встречном» соединении катушечных групп в фазах.

При «согласном» соединении двухслойных обмоток число последовательно соединенных рядом лежащих катушек в катушечной группе увеличивается в 2 раза за счет уменьшения в 2 раза числа катушечных групп и занимает $2q$ рядом лежащих пазов. В этом случае сторона катушечной группы занимает 120-градусную фазную зону.

Такое соединение приводит к значительному уменьшению (до 15%) результирующей величины, наведенной фазной э. д. с., по сравнению с э. д. с. обмотки, соединенной «встречно». Следовательно, для ее сохранения пришлось бы увеличить соответственно число витков, что в конечном итоге приведет к увеличению расхода меди.

На рис. 3-10,*а* представлена схема двухслойной петлевой обмотки двигателя с полным шагом, имеющая $2p=4$; $z=36$ пазов.

Изобразим звезду пазовых э. д. с. и э. д. с. обмотки, определим величину наведенной э. д. с. для обоих случаев.

Шестидесятиградусная фазная зона. Число пазов на полюс и фазу

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{36}{2\cdot 2\cdot 3}=3.$$

Диаметральный шаг обмотки

$$y_0 = \tau = \frac{z}{2p} = \frac{36}{4} = 9.$$

Число катушечных групп

$$A = 6p = 6 \cdot 2 = 12.$$

Звезда пазовых э. д. с. обмотки представлена на рис. 3-10,*б*.

Для определения величины наведенной э. д. с. по фазам построим звезду э. д. с. обмотки. Далее приведен порядок соединения сторон катушек по фазам, на основании которого построена звезда э. д. с. обмотки (рис. 3-10,*в*).

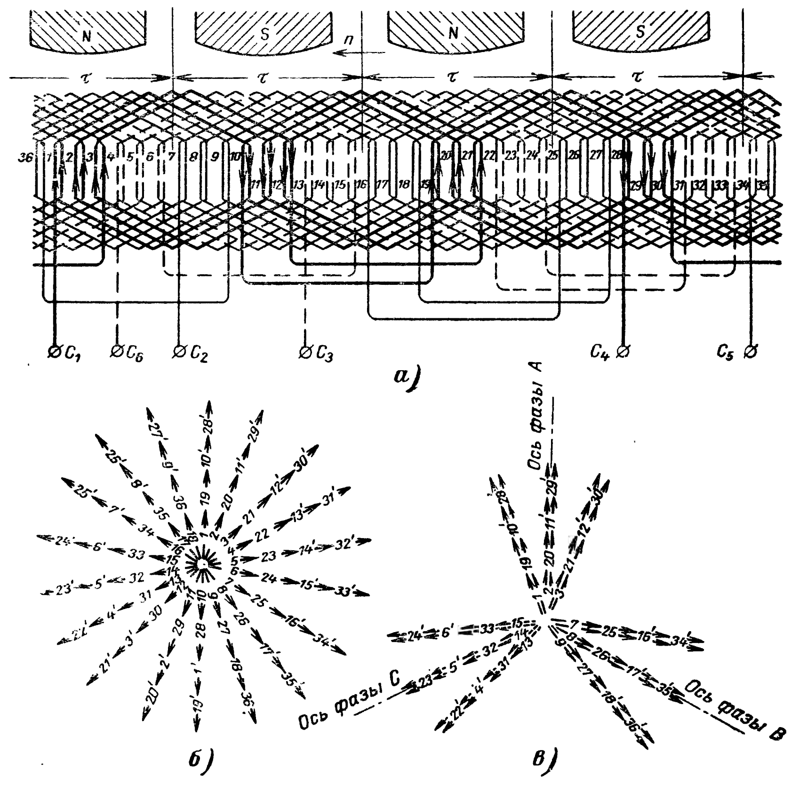
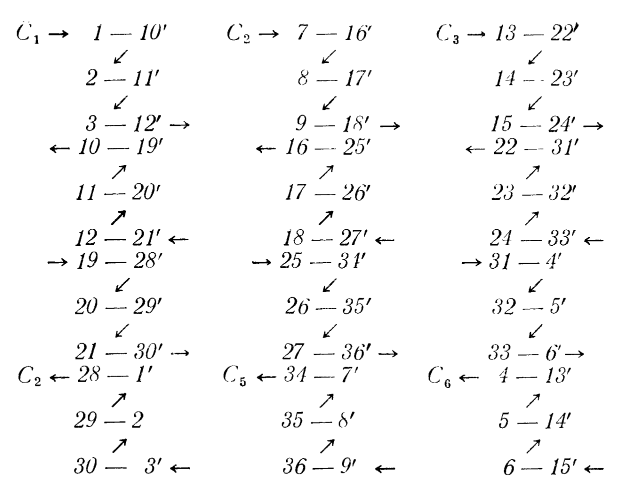


Рис. 3-10. Двухслойная обмотка.
$z=36$; $2p=4$; $q=3$; $y_0=\tau=9$.
а — схема; *б* — звезда пазовых э. д. с.; *в* — звезда э. д. с. обмотки.



а)

б)

Рис. 3-11. Двухслойная обмотка с «согласным» включением катушечных групп (120-градусная фазная зона).

$z=36$; $2p=4$; $2q=6$; $y_0=\tau$.
а — схема; *б* — звезда пазовых э. д. с.

Принимая величину э. д. с. в стороне секции за единицу, определим величину наведенной э. д. с. в фазе при 60-градусной фазной зоне, для чего спроектируем величину пазовых э. д. с. на ось фазы A (рис. 3-10,*в*).

$$U_{60} = 8 + 16\cos\alpha = 8 + 16\cos 20^\circ = 8 + 16\cdot 0{,}9397 = 23.$$

Стодвадцатиградусная фазчая зона. Число последовательно соединенных катушек в катушечной группе $2q = 2\cdot 3 = 6$.

Диаметральный шаг обмотки $y_0 = \tau = \frac{z}{2p} = \frac{36}{4} = 9.$

Число катушечных групп $A_{120^\circ} = 3p = 3\cdot 2 = 6.$

На основании этих данных изображена схема на рис. 3-11,*а*, из которого видно, что число катушечных групп в 2 раза меньше, чем при «встречном» включении. Соединение сторон катушек фазы примет следующий вид:

Фаза A	Фаза B	Фаза C
C_1 → 1 — 10′	C_2 → 7 — 16′	C_3 → 13 — 22′
↙ 2 — 11′	↙ 8 — 17′	↙ 14 — 23′
↙ 3 — 12′	↙ 9 — 18′	↙ 15 — 24′
↙ 4 — 13′	↙ 10 — 19′	↙ 16 — 25′
↙ 5 — 14′	↙ 11 — 20′	↙ 17 — 26′
↙ 6 — 15′ →	↙ 12 — 21′ →	↙ 18 — 27′ →
→ 19 — 28′	→ 25 — 34′	→ 31 — 4′
↙ 20 — 29′	↙ 26 — 35′	↙ 32 — 5′
↙ 21 — 30′	↙ 27 — 36′	↙ 33 — 6′
↙ 22 — 31′	↙ 28 — 1′	↙ 34 — 7′
↙ 23 — 32′	↙ 29 — 2′	↙ 35 — 8′
↙ 24 — 33′ → C_4	↙ 30 — 3′ → C_5	↙ 36 — 9′ → C_6

По этим данным построена результирующая звезда э. д. с. обмотки, соединенной «согласно» (рис. 3-11,*б*). Геометрические суммы э. д. с. катушек каждой фазы равны и сдвинуты друг относительно друга на 120°.

Следовательно, и при «согласном» соединении катушечных групп образуется симметричная трехфазная обмотка.

Для определения величины э. д. с. фазы с фазной зоной, равной 120° ($U_{A120°}$), спроектируем э. д. с. сторон катушек на ось фазы A. $U_{A120°} = 8\cos 10° + 8\cos 30° + 8\cos 50° = 8(\cos 10° + \cos 30° + \cos 50°) = 8(0{,}9848 + 0{,}8660 + 0{,}6428) = 8 \cdot 2{,}493 = 20$. Электродвижущая сила обмотки с фазной зоной в 60° («встречное» соединение катушечных групп) в 23/20=1,15 раза больше, чем э. д. с. обмотки с фазной зоной в 120°.

Мерой использования обмотки является отношение геометрической суммы э. д. с. катушек фазы обмоток к их алгебраической сумме и называется коэффициентом распределения обмотки.

При соединении катушечных групп «встречно» (60-градусная фазная зона) коэффициент распределения обмотки равен:

$$k_{р60°} = \frac{23}{24} = 0{,}96.$$

При «согласном» соединении катушечных групп (120-градусная фазная зона) коэффициент распределения обмотки равен:

$$k_{р120°} = \frac{20}{24} = 0{,}836.$$

Отношение коэффициента распределения обмотки 60-градусной зоны к 120-градусной равно:

$$\frac{k_{р60°}}{k_{р120°}} = \frac{0{,}96}{0{,}836} = 1{,}15.$$

В связи с тем, что коэффициент использования двухслойной обмотки, образующей шестидесятиградусную фазную зону, на 15% больше, чем у обмотки, образующей 120-градусную фазную зону, двухслойные обмотки соединяются только «встречно».

3-5. СОЕДИНЕНИЕ КАТУШЕЧНЫХ ГРУПП ДВУХСЛОЙНЫХ ОБМОТОК

Последовательное соединение, $a_2 = 1$, можно выполнить с короткими перемычками, соединяя катушечные группы *1*, *4*, *7* и др., и с длинными перемычками, соединяя катушечные группы *1*, *7*, *13* и т. д.

На рис. 3-10 дана схема последовательного соединения катушечных групп с короткими перемычками. Для

выполнения этого соединения конец катушечной группы 1 соединен с концом группы 4, начало группы 4 — с началом группы 7 и т. д.

Параллельное соединение, $a_2=2p$. Для включения катушечных групп параллельно их следует соединять таким образом, чтобы направление токов в них было таким же, как и при последовательном включении (рис. 1-18,*а*). Для этого нужно к одному зажиму, образующему «начало» фазы C_1, подключить начало катушечной группы *1,* конец катушечной группы *4,* начало группы *7* и т. д. К другому зажиму, образующему конец фазы C_4, подключить оставшиеся выводные концы катушечных групп.

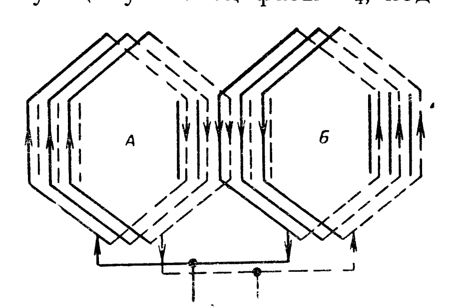


Рис. 3-12. Неправильное параллельное соединение катушечных групп.

Если обмотку соединить параллельно так, как это показано на рис. 3-12, то наведенная э. д. с. в обмотке статора равна нулю.

Предположим, что в рассматриваемый момент времени **ток от наведенных э. д. с. в** сторонах пазов ***1*, *2* и *3*** имеет указанное на рис. 3-12 направление. Тогда для катушечной группы *А* он будет входить в верхние, а выходить из нижних проводников. Для катушечной группы *Б* ток будет входить в нижние проводники, а выходить из верхних. Поэтому если мы соединим параллельно два верхних начала и два нижних конца, то на зажимах двух катушечных групп напряжение будет равно нулю.

Приложенное напряжение сети будет целиком уравновешиваться падением напряжения в активном и реактивном сопротивлениях.

Так как эти сопротивления очень малы, то ток в обмотке будет настолько большим, что она может сгореть.

Образование p параллельных ветвей $a_2=p$. При $a_2=$ $=p$ в каждой параллельной ветви будет по две последовательно соединенные катушечные группы:

$$\frac{2p}{a_2}=\frac{2p}{p}=2.$$

Так как это выражение справедливо при любом значении $2p$, можно сказать, что все двухслойные обмотки могут иметь p параллельных ветвей.

Порядок соединения показан на рис. 3-13. Приведенная схема наиболее желательна для асинхронных двигателей.

Из рис. 3-13 видно, что для выполнения параллельного соединения каждую из двух (четного количества) по-

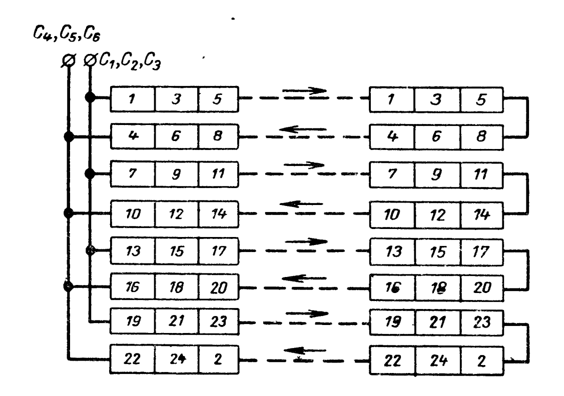


Рис. 3-13. Схема соединения с четным числом катушечных групп в параллельной ветви. $2p=8$; $a_2=p=4$.

следовательно соединенных катушечных групп следует присоединить к зажиму, образующему начало фазы C_1, выводные концы параллельных ветвей, имеющих одинаковое направление токов, в нашем случае «начало» 1-й, 7-й и 13-й. Оставшиеся концы 4-й, 9-й и 16-й, имеющие также одинаковое, но противоположное направление токов, подключают к зажиму, образующему «конец» фазы C_4.

Обмотка имеет $p/2$ параллельных ветвей. Так как при $a_2=p/2$ число последовательно соединенных катушечных групп в каждой последовательной ветви равно

$$\frac{2p}{a_2}=\frac{2p}{p/2}=4,$$

то $a_2=p/2$ выполняется только в тех обмотках, где число катушечных групп в фазе делится на 4; сюда относят-

ся обмотки следующих машин:

$$2p=8;\quad \frac{2p}{p/2}=\frac{8}{4}=2;$$

$$2p=12;\quad \frac{2p}{p/2}=\frac{12}{3}=4;$$

$$2p=16;\quad \frac{2p}{p/2}=\frac{16}{4}=4.$$

Таким образом, $p/2$ параллельных ветвей могут иметь обмотки машин с числом полюсов 4, 8, 12, 16, 20 и т. д.

Таблица 3-2

Число полюсов $2p$	Возможное число параллельных ветвей, a_2	Число полюсов $2p$	Возможное число параллельных ветвей a_2
2	2	18	2, 3, 6, 9, 18
4	2, 4	20	2, 4, 5, 10, 20
6	2, 3, 6	22	2, 11, 22
8	2, 4, 8	24	2, 3, 4, 6, 8, 12, 24
10	2, 5, 10	26	2, 13, 26
12	2, 3, 4, 6, 12	28	2, 4, 7, 14, 28
14	7, 14	30	2, 3, 5, 6, 10, 15, 30
16	2, 4, 8, 16	32	2, 4, 8, 16, 32

Возможное число параллельных ветвей a_2 в зависимости от числа полюсов $2p$ при целом числе пазов на полюс и фазу q дано в табл. 3-2.

3-6. СИММЕТРИЧНЫЕ ОБМОТКИ С ДРОБНЫМ q

При рассмотрении обмоток с целым числом пазов на полюс и фазу было установлено, что чем большее значение имеет величина q, тем форма кривой э. д. с. обмотки статора ближе к синусоиде. Однако увеличение числа пазов на полюс и фазу, особенно в тихоходных машинах, значительно удорожает стоимость электрических машин вследствие значительного увеличения размеров машины и расхода пазовой изоляции, что для машин свыше 500 *в* имеет большой удельный вес в общей стоимости. Стремление получить синусоидальное напряжение при малой величине q вызвало широкое применение обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу, особенно в тихоходных машинах свыше 500 *в* и в гидрогенерато-

рах, где большое число полюсов и без того приводит к большим размерам.

Кроме того, применение обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу дает возможность использовать существующие штампы для изготовления машин с различным числом оборотов и тем самым снизить расходы производства.

Условия выполнимости симметричных двухслойных обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу.

1. Число пазов, деленное на число фаз, должно равняться целому числу:

$$\frac{z}{m} = \text{целому числу.}$$

1. Знаменатель дробности d не должен быть равен или кратен числу фаз m:

$$\frac{d}{m} \neq \text{целому числу.}$$

3. Число полюсов $2p$ должно быть кратно знаменателю дробности d:

$$\frac{2p}{d} = \text{целому числу.}$$

Звезда пазовых э. д. с. двухслойных обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу. Так как в двухслойных обмотках с дробным числом пазов на полюс и фазу в одном пазу могут находиться стороны катушек различных фаз, то для анализа этих обмоток лучше всего построить полную звезду пазовых э. д. с.

Построение звезды пазовых э. д. с. проведем на следующем примере.

Пример.

$$z = 30;\ 2p = 8;\ q = \frac{z}{2pm} = \frac{30}{3 \cdot 8} = 1\frac{1}{4} = \frac{5}{4}.$$

Пазовый угол

$$\alpha = \frac{60}{q} = \frac{60}{1\frac{1}{4}} = 48 \text{ эл. град.}$$

Если направление вектора э. д. с. в первом пазу принять за нулевое, то угол сдвига фаз э. д. с. в остальных пазах выразится следующим образом:

№ пазов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Угол сдвига по отношению к 1-му пазу, *эл. град*	0	48	96	144	192	240	288	336	24	72	120	168	216	264	312	360

16-му пазу соответствует угол 360° или 0°, т. е. с 16-го паза начинается повторяющаяся часть. На рис. 3-14 дана схема обмотки одной фазы.

Начертим звезду пазовых э. д. с. отдельных полюсов одной плоскости, для чего отложим вектор паза *1* в горизонтальном направлении (рис. 3-14,*б*). Затем отложим

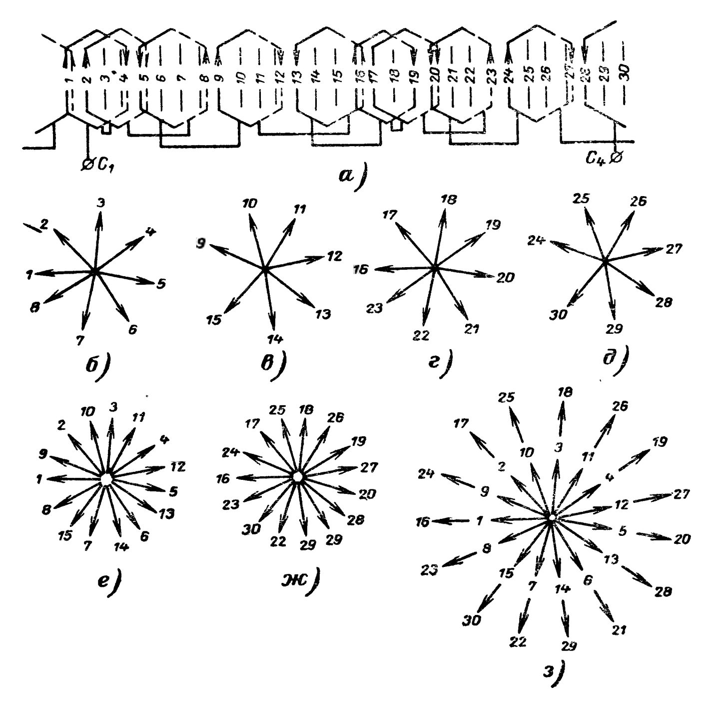


Рис. 3-14. Трехфазная двухслойная обмотка.

$2p=8$; $z=30$; $q=1\frac{1}{4}$

а — схема фазы *А*; *б* — звезда пазовых э. д. с. первой пары полюсов первого слоя; *в* — то же второй пары полюсов; *г* — то же третьей пары полюсов; *д* — то же четвертой пары полюсов; *е* — звезда пазовых э. д. с. первой повторяющейся части одного слоя; *ж* — то же второй повторяющейся части; *з* — полная звезда пазовых э. д. с. первого слоя.

по часовой стрелке со сдвигом на угол 48° вектор э. д. с. паза *2*, паза *3* и т. д. Отложив восемь векторов э. д. с. для первых восьми пазов, построим звезду пазовых э. д. с. для первой пары полюсов.

При построении звезды пазовых э. д. с. второй пары полюсов видно, что вектор *9* — первый вектор второй пары полюсов — не совпадает с вектором *1*, а сдвинут по отношению к нему на 24°, в то время как при q, равном целому числу, первые векторы первой и второй пары полюсов совпадают (рис. 1-13). Следовательно, векторы пазовых э. д. с. *10, 11, 12, 13, 14* и *15* также не совпадают с векторами *2*, *3*, *4*, *5*, *6*, *7* и *8*.

Расположение векторов пазовых э. д. с. третьей пары полюсов повторяет расположение первой пары, а четвертой — повторяет расположение второй.

Если совместить звезды пазовых э. д. с. отдельных пар полюсов (рис. 3-14,*б* и *в*), получим звезду пазовых э. д. с. одной повторяющейся части обмотки первой плоскости (рис. 3-14,*е*). Из рисунков видно, что в обмотках с дробным числом пазов на полюс и фазу отдельные катушечные группы, входящие в состав одной фазы и расположенные против разных полюсов, сдвинуты между собой по фазе, благодаря чему форма кривой э. д. с. таких обмоток эквивалентна э. д. с. обмоток, имеющих бо́льшее число пазов на полюс и фазу.

Звезду пазовых э. д. с. второго слоя можно получить из первой путем поворота этих же векторов на 180°, обозначенных тем же номером паза с добавлением знака «штрих» или наоборот.

На рис. 3-15,*а* даны звезды пазовых э. д. с. одной повторяющейся части, а на рис. 3-15,*б* — второй повторяющейся части для обоих слоев обмотки. Полная звезда пазовых э. д. с., полученная путем наложения звезд пазовых э. д. с. обоих повторяющихся частей, дана на рис. (3-16,*б*).

В отличие от звезды пазовых э. д. с. двухслойных обмоток с целым числом пазов на полюс и фазу, где два полюса дают повторяющуюся часть обмотки, а нумерация лучей звезды совпадает с нумерацией пазов, в обмотках с дробным числом пазов на полюс и фазу повторяющаяся часть обмотки дает d полюсов, а нумерация лучей звезды пазовых э. д. с. зависит от степени дробности. При этом между двумя соседними пазами звезды пазовых э. д. с., например между пазами *1* и *2*,

располагаются d—1 векторов пазовых э. д. с. В нашем случае при $d=4$ между соседними пазами — 4—1=3 других вектора (рис. 3-16,*б*). Звезда э. д. с. обмотки, построенная в соответствии со схемой на рис. 3-16,*а* дана на рис. 3-16,*в*. Из рисунка видно, что геометрические суммы э. д. с. всех катушек каждой фазы равны между собой и сдвинуты друг относительно друга на 120°. Это свиде-

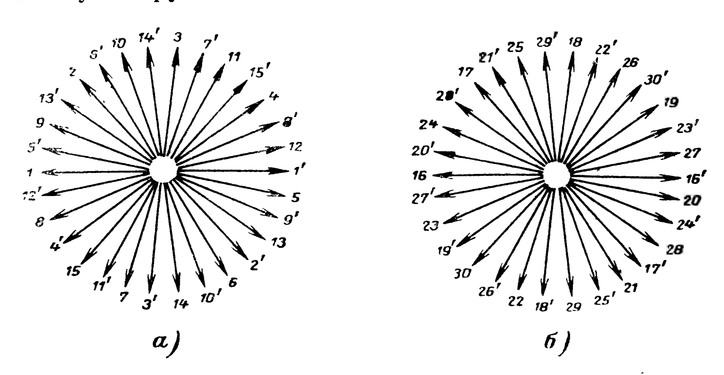


Рис. 3-15. Звезда пазовых э. д. с. обмотки.

$$z=30;\ 2p=8;\ q=1\frac{1}{4}.$$

а — звезда пазовых э. д. с. первой повторяющейся части; *б* — то же второй повторяющейся части.

тельствует о том, что обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу является симметричной и образует правильную трехфазную систему, за исключением случая, когда знаменатель дробности d равен или кратен трем, что будет рассмотрено отдельно.

Эквивалентное число пазов на полюс и фазу обмотки с дробным числом пазов $q_{экв}$ *и числом пар полюсов* $p_{экв}$. Из рис. 3-15,*а*, *б* видно, что каждая повторяющаяся часть обмотки с дробным q состоит из 30 векторов пазовых э. д. с. Угол между соседними векторами

$$\alpha=\frac{360}{30}=12\ \text{эл. град}.$$

Такую же звезду пазовых э. д. с. будет иметь обмотка с целым q с числом пазов $z=30$ и числом пар полюсов $p=1$. Звезда пазовых э. д. с. обмотки также будет состоять из 30 векторов пазовых э. д. с. с углом между

ними 12 *эл. град*. Однако число пазов на полюс и фазу в этом случае будет:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{30}{2\cdot 3}=5.$$

Отсюда делаем вывод, что обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу $q=1\frac{1}{4}$ в электрическом отношении по форме кривой э. д. с. эквивалентна обмотке с це-

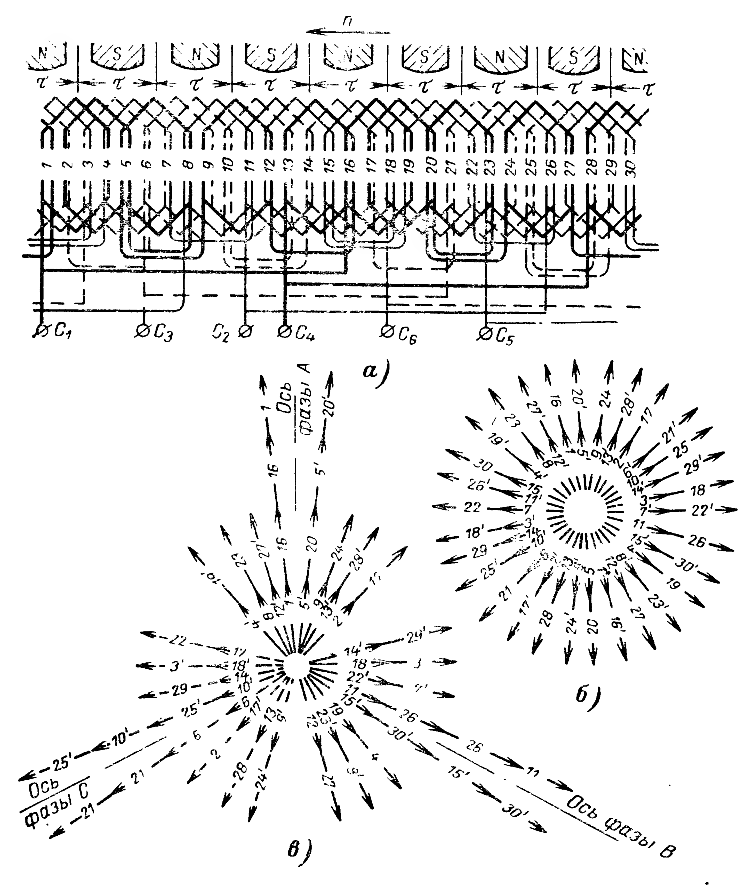


Рис. 3-16. Обмотка с дробным числом пазов на полюс и фазу. $z=30$; $2p=8$; $q=1\frac{1}{4}$.

а — схема; *б* — полная звезда пазовых э. д. с.; *в* — звезда э. д. с. обмотки.

лым числом пазов на полюс и фазу, имеющей $q_{экв}=5$ и $p_{экв}=1$.

С другой стороны, выражение $bd+c$ для нашего примера также равно 5:

$$bd+c=1\cdot 4+1=5.$$

Следовательно,

$$q_{экв}=bd+c. \qquad (3\text{-}1)$$

Из рис. 3-14,*ж* видно, что, начиная с паза *16*, расположение векторов пазовых э. д. с. в магнитном поле повторяется, так как фаза вектора паза *16* совпадает с вектором паза *1*, фаза вектора паза *17* — с вектором паза *2* и т. д. Это значит, что через четыре полюса повторяются аналогичные магнитные условия. В нашем случае при $d=4$ каждые четыре полюса дают повторяющуюся часть обмотки. Таким образом, число повторяющихся частей обмотки можно определить как частное от деления числа полюсов на знаменатель дробности d:

$$t=\frac{2p}{d}. \qquad (3\text{-}2)$$

Для выявления характера кривой э. д. с. фазы достаточно рассмотреть только одну повторяющуюся часть обмотки. Из рис. 3-15,*а*, *б* видно, что повторяющиеся части обмотки не имеют между собой сдвига по фазе, поэтому их можно соединять последовательно и параллельно. Так как повторяющаяся часть обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу эквивалентна одной паре полюсов обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу при $q=5$, то эквивалентное число пар полюсов будет равно числу повторяющихся частей обмотки:

$$p_{экв}=t=\frac{2p}{d}.$$

Форма кривой напряжения зависит от степени дробности q. Чем больше степень дробности, тем лучше форма кривой.

В качестве примера определим $q_{экв}$ и $p_{экв}$ для гидрогенератора, имеющего $z=600$ пазов и $2p=68$.

1. Число пазов на полюс и фазу

$$a=\frac{z}{2pm}=\frac{600}{68\cdot 3}=2\frac{16}{17};\ b=2;\ c=16;\ d=17.$$

2. Число пазов на полюс и фазу, эквивалентное обмотке с целым числом пазов,

$$q_{экв} = bd + c = 2 \cdot 17 + 16 = 50.$$

3. Эквивалентное число пар полюсов

$$p_{экв} = t = \frac{2p}{d} = \frac{68}{17} = 4.$$

Таким образом, обмотка данного генератора с точки зрения приближения формы кривой э. д. с. к синусоиде эквивалентна обмотке с целым числом пазов на полюс и фазу, равным 50, и числом пар полюсов $p_{экв} = 4$.

Такое свойство обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу дает возможность при небольших значениях величины q иметь кривую э. д. с., близкую к синусоиде. Это является весьма важным, в особенности для электрических машин свыше 500 *в* с большим количеством полюсов, у которых с целью экономии пазовой изоляции и уменьшения размеров стремятся к небольшим значениям q.

3-7. ОБРАЗОВАНИЕ КАТУШЕЧНЫХ ГРУПП ДВУХСЛОЙНЫХ ОБМОТОК С ДРОБНЫМ q

Ранее были рассмотрены симметричные петлевые обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу, имеющие одинаковое количество последовательно соединенных катушек в каждой катушечной группе, равное q.

В двухслойных обмотках с дробным числом пазов на полюс и фазу число последовательно соединенных катушек в катушечной группе не равно q, так как катушечная группа не может иметь дробного числа последовательно соединенных катушек.

Как было пояснено выше, обмотку с дробным q составляют катушечные группы с различным числом последовательно соединенных катушек, так называемые «малые» и «большие» катушечные группы.

Дробное значение q в общем случае может быть выражено следующей формулой:

$$q = \frac{z}{2pm} = b + \frac{c}{d} = \frac{q_{экв}}{d}, \tag{3-3}$$

где b — целая часть дроби; c — числитель дробности; d — знаменатель дробности; $q_{экв}$ — число соседних кату-

шек, из которых можно образовать d катушечных групп заданного значения q. При этом c/d должно быть правильной дробью.

Пример.

Если $q = 2\frac{3}{10}$, то $b = 2$; $c = 3$ и $d = 10$.

Если $q = 2\frac{2}{10}$, то для определения величин c и d дробную часть надо сократить и превратить в правильную дробь, т. е. $q = 2\frac{2}{10} = 2\frac{1}{5}$. В этом случае $b = 2$; $c = 1$ и $d = 5$.

В дальнейшем будем считать, что дробная часть c/d представляет собой несократимую правильную дробь

$$q = b + \frac{c}{d} = \frac{bd + c}{d}.$$

Поэтому, чтобы получить дробное q, надо взять $bd+c$ соседних катушек и образовать из них d катушечных групп заданного значения q. Часть катушечных групп будет состоять из b последовательно соединенных катушек, а другая часть из $b+1$ катушек. Они должны группироваться в определенной закономерности. Такую группировку d катушечных групп в дальнейшем будем называть чередованием.

Таким образом, чередование — это ряд, состоящий из d однозначных чисел, показывающих в определенном порядке группировку «больших» и «малых» катушечных групп. Число «больших» и «малых» катушечных групп в чередовании.

Введем следующие обозначения:

$A_{б.ч}$, $A_{м.ч}$ — число «больших» и «малых» катушечных групп в чередовании; $A_ч$ — общее число катушечных групп в чередовании:

$$A_ч = A_{б.ч} + A_{м.ч} = d, \tag{3-4}$$

тогда

$$bd + c = A_{м.ч}b + A_{б.ч}(b + 1). \tag{3-5}$$

Разделив обе части уравнения на b, получим:

$$d + \frac{c}{b} = A_{м.ч} + A_{б.ч} + \frac{A_{б.ч}}{b}. \tag{3-6}$$

Подставляя значение $A_{м.ч} + A_{б.ч}$ из равенства (3-4), получаем:

$$d + \frac{c}{b} = d + \frac{A_{б.ч}}{b},$$

откуда

$$\frac{c}{b} = \frac{A_{б.ч}}{b} \text{ или } A_{б.ч} = c. \qquad (3\text{-}7)$$

Таким образом, число «больших» катушечных групп в чередовании равно числителю дробной части q.

Число «малых» катушечных групп в чередовании $A_{м.ч}$ определяем из равенства (3-4):

$$A_{м.ч} = d - A_{б.ч} = d - c. \qquad (3\text{-}8)$$

Число «малых» катушечных групп в чередовании равно разности между знаменателем и числителем дробной части q.

Таким образом, количество «больших» и «малых» катушечных групп в чередовании в зависимости от c/d определяется однозначно.

Пример. Определить количество „больших" и малых„ катушечных групп в чередовании обмотки электродвигателя при $z = 66$; $2p = 8$:

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{66}{3 \cdot 8} = 2\frac{3}{4}; \ b = 2; \ b + 1 = 3; \ d = 4;$$

$$A_{м.ч} = d - c = 4 - 3 = 1; \ A_{б.ч} = c = 3; \ A_{ч} = d = 4.$$

Определение числа чередований всей обмотки. Так как чередование занимает $bd+c$ пазов, то для определения числа чередований $N_{ч.д}$ нужно общее число пазов разделить на число пазов, занимаемых одним чередованием:

$$N_{ч.д} = \frac{z}{bd + c} = \frac{2pmq}{bd + c} = 2pm\frac{\frac{bd + c}{d}}{bd + c} = \frac{2pm}{d}. \qquad (3\text{-}9)$$

Число чередований должно быть целым числом, иначе обмотка с заданным q будет невыполнима.

Определение числа «больших» и «малых» катушечных групп всей обмотки.

Обозначим:

A — число катушечных групп всей обмотки. $A_{б}$, $A_{м}$ — число «больших» и «малых» катушечных групп всей обмотки.

Для определения числа катушечных групп всей обмотки нужно число катушечных групп чередования умножить на число чередований. Аналогично поступаем при определении $A_б$ и $A_м$:

$$A = A_ч N_ч = d\frac{2pm}{d} = 2pm; \qquad (3\text{-}10)$$

$$A_б = A_{ч.б} N_ч = d\frac{2pm}{d} = \frac{c}{d}A; \qquad (3\text{-}11)$$

$$A_м = A_{ч.м} N_ч = (d-c)\frac{2pm}{d} = \frac{d-c}{d}A. \qquad (3\text{-}12)$$

Пример. Определить число «больших» и «малых» катушечных групп и число чередований обмотки электродвигателя, имеющего $z=54$ и $2p=8$.

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{54}{3 \cdot 8} = 2\frac{1}{4}; \; b=2; \; b+1=3; \; c=1; \; d=4.$$

Обшее число катушечных групп в электродвигателе равно:

$$A = 2pm = 2 \cdot 4 \cdot 3 = 24.$$

Число „больших" катушечных групп в обмотке

$$A_б = \frac{c}{d}A = \frac{1}{4} \cdot 24 = 6.$$

Число „малых" катушечных групп

$$A_м = \frac{d-c}{d}A = \frac{4-1}{4} \cdot 24 = 18.$$

Число чередований равно:

$$N_ч = \frac{8 \cdot 3}{4} = 6.$$

Группировка катушечных групп в чередовании. Для выполнения обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу недостаточно иметь схему соединения обмотки, необходимо знать последовательность чередования «больших» и «малых» катушечных групп. Различают два характерных случая группировки катушечных групп: 1) c/d — несократимая дробь; 2) c/d — имеет общий делитель t.

Если c/d — несократимая дробь, то знаменатель дробности d равен числу полюсов и показывает, по скольку катушечных групп следует группировать в фазе.

Пример.

$$z = 27;\ 2\,p = 4;\ q = \frac{z}{2pm} = \frac{27}{3 \cdot 4} = 2\,\frac{1}{4}.$$

В этом случае d равно числу полюсов.
Второй случай c/d имеет общий делитель t.

$$z = 60;\ 2\,p = 16;\ q = \frac{z}{2pm} = \frac{60}{2 \cdot 8 \cdot 3} = 1\,\frac{2}{8} = 1\,\frac{1}{4};$$

обмотка состоит из четырех повторяющихся частей. Знаменатель дробности d не равен числу полюсов, а показывает число катушечных групп в одном чередовании.

Распределение «больших» и «малых» катушечных групп внутри чередования. Распределение «больших» и «малых» катушечных групп в чередовании зависит от соотношения дробной части q, т. е. от c/d, и не зависит от величины b. Если q имеет несложную дробность, то числовой ряд получается весьма простым.

Рассмотрим случаи простых группировок катушечных групп внутри чередования.

1) $\frac{c}{d} = \frac{1}{2}$.

В этом случае «большая» катушечная группа, состоящая из $(b+1)$ последовательно соединенных катушек, чередуется с «малой» катушечной группой, состоящей из b последовательно соединенных катушек.

Пример.

$$q = 3\,\frac{1}{2};\ b = 3;\ b+1 = 4;\ c = 1;\ d = 2.$$

$$A_{б.ч} = c = 1;\ A_{м.ч} = d - c = 2 - 1 = 1;\ A_{ч} = d = 2.$$

Чередование примет следующий вид: 3,4.

2) $c = 1;\ d > 2$.

В этом случае „большие“ катушечные группы располагаются через $(d-1)$ „малых“ катушечных групп.

Пример.

$$q = 2\,\frac{1}{5};\ b = 2;\ b+1 = 3;\ c = 1;\ d = 5.$$

$$A_{б.ч} = c = 1;\ A_{м.ч} = d - c = 5 - 1 = 4;\ A_{ч} = d = 5.$$

Чередование примет следующий вид: 2, 2, 2, 2, 3.

3) $c = d - 1;\ \frac{c}{d} = \frac{d-1}{d}$.

В этом случае «малые» катушечные группы располагаются в чередовании через $d-1$ больших катушечных групп.

Пример.

$$q=2\frac{4}{5};\ b=2;\ b+1=3;\ c=4;\ d=5;$$

$$A_{б.ч}=c=4;\ A_{м.ч}=d-c=5-4=1;\ A_ч=d=5.$$

Чередование примет следующий вид: 3, 3, 3, 3, 2.

4) $c=\frac{d}{2}\pm\frac{1}{2}$, d равно нечетному числу $\frac{c}{d}=\frac{d\pm1}{2d}$. Если $\frac{c}{d}=\frac{d+1}{2d}$, то число „больших" катушечных групп в чередовании на одну больше числа „малых". В случае, если $\frac{c}{d}=\frac{d-1}{2d}$, число „малых" катушечных групп в чередовании на одну больше числа „больших". Группировку катушечных групп внутри чередования надо начинать с тех, которых в чередовании больше. Так, если $q=2\frac{4}{7}$, то чередование примет вид: 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3. При $q=2\frac{3}{7}$ чередование будет: 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2.

Рассмотренные случаи группировки катушечных групп имеют несложную дробность, и, следовательно, числовой ряд получается весьма простым и не вызывает трудностей. В случае более сложной дробности составление числового ряда чередования осложняется и часто требует большого количества вычислительных операций. Ниже излагается простой способ нахождения числового ряда, пригодного для любого дробного значения q. Переходя к изложению этого способа, напомним, что структура ряда чередования определяется дробью c/d и не зависит от величины b, в том числе и при $b=0$. Это свойство числового ряда чередования можно использовать для упрощения нахождения требуемого числового ряда.

Для заданной дроби c/d нужно найти исходный числовой ряд (при $b=0$), а затем пересчитать его для заданного значения b, прибавляя к каждому числу исходного ряда число b.

Суть метода заключается в том, что, зная величину c/d, всегда можно определить число «малых» и «больших» катушечных групп, которые должны располагаться в чередовании по возможности равномерно.

При этом различаются два случая:

$$1)\ \frac{c}{d}<\frac{1}{2};\quad 2)\ \frac{c}{d}>\frac{1}{2}.$$

В первом случае одна «большая» катушечная группа чередуется с одной «малой» или с двумя «малыми». При этом исходный числовой ряд в чередовании примет следующий вид:

1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0 и т. д.

Во втором — одна «малая» катушечная группа чередуется с одной «большой» или с двумя «большими».

0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1 и т. д.

Определение группировки катушечных групп внутри чередования проведем на примерах.

Группировка катушечных групп внутри чередования при

$$\frac{c}{d} < \frac{1}{2}.$$

Пример. Определить группировку катушечных групп внутри чередования при $q = 2\frac{7}{17}$; $b = 2$; $b + 1 = 3$; $c = 7$; $d = 17$.

$$A_{м.ч} = d - c = 17 - 7 = 10; \quad A_{б.ч} = c = 7; \quad A_{ч} = d = 17.$$

Следовательно, чередование состоит из десяти «малых» катушечных групп и семи «больших», которые следует распределить в чередовании равномерно.

Исходный числовой ряд при $b = 0$ примет следующий вид:

1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0.

При $b = 2$ группировка катушечных групп чередования примет следующий вид:

3, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2.

Следует отметить, что эта группировка катушечных групп внутри чередования не является однозначным решением, можно найти другие варианты группировки, которые дают аналогичные результаты с точки зрения равномерного распределения «больших» и «малых» катушечных групп в чередовании.

Ниже приводятся другие варианты группировок катушечных групп в чередовании:

3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2;

3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2.

Группировка катушечных групп внутри чередования при $c/d > 1/2$.

Пример. Определить группировку катушечных групп внутри чередования при $q = 3\frac{11}{19}$; $b = 3$; $b + 1 = 4$; $c = 11$; $d = 19$.

$$A_{м.ч} = d - c = 19 - 11 = 8; \ A_{б.ч} = c = 11; \ A_ч = d = 19.$$

Чередование состоит из восьми «малых» катушечных групп и одиннадцати «больших». Составлен исходный числовой ряд при $b = 0$, в котором «большие» и «малые» катушечные группы постараемся расположить равномерно:

0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1.

При $b = 3$ группировка катушечных групп примет следующий вид:

3, 4, 3, 4, 4, 3, 4, 3, 4, 4, 3, 4, 3, 4, 3, 4, 4, 3, 4.

Два других варианта группировок катушечных групп внутри чередования примут следующий вид:

3, 4, 4, 3, 4, 3, 4, 3, 4, 4, 3, 4, 3, 4, 4, 3, 4, 3, 4;

3, 4, 4, 3, 4, 3, 4, 4, 3, 4, 3, 4, 3, 4, 4, 3, 4, 3, 4.

Числовой ряд чередования является замкнутым на себя кольцевым рядом. Поэтому при его изображении в виде строки можно читать, начиная с любого члена, сохраняя лишь порядок членов.

Например, в данном случае:

3, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2

2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3

3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2

2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3

и т. д.

Правильность схемы обмотки не зависит от того, с какого члена начинается ряд, выполненный в виде строки. Однако, выбрав определенный ряд, его надо повторять столько раз, сколько чередований в обмотке.

Для определения группировки катушечных групп чередования можно пользоваться табл. 3-3, где дана группировка исходного числового ряда в зависимости от величины c/d при $b=0$.

Пример.

$$q = 4\frac{3}{8};\ b = 4;\ \frac{c}{d} = \frac{3}{8}$$

из табл. (3-3).

Таблица 3-3

c/d	Группировка катушечных групп в чередовании	c/d	Группировка катушечных групп в чередовании
1/2	1 0	5/7	1 1 1 0 1 1 0
1/4	1 0,0 0	6/7	1 1 1 1 1 1 0
3/4	1 1 1 0	1/8	1 0 0 0 0 0 0 0
1/5	1 0 0 0 0	3/8	1 0 1 0 0 1 0 0
2/5	0 1 0 1 0	5/8	1 1 0 1 1 0 1 0
3/5	1 0 1 0 1	7/8	1 1 1 1 1 1 1 0
4/5	1 1 1 1 0	1/10	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0
1/7	1 0 0 0 0 0 0	3/10	1 0 0 1 0 0 1 0 0 0
2/7	1 0 0 1 0 0 0	7/10	1 1 1 0 1 1 0 1 1 0
3/7	0 1 0 1 0 1 0	9/10	1 1 1 1 1 1 1 1 1 0
4/7	1 0 1 0 1 0 1		

Получим следующий исходный ряд: 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0.

Так как целая часть q равна 4, то его надо прибавить ко всем числам, полученным из табл. 3-3. Таким образом, группировка катушечной группы чередования будет иметь следующий вид: 5, 4, 5, 4, 4, 5, 4, 4.

3-8. СОЕДИНЕНИЕ КАТУШЕЧНЫХ ГРУПП ДВУХСЛОЙНЫХ ОБМОТОК С ДРОБНЫМ q

После того как описанным выше способом вся обмотка разбита на катушечные группы, а катушечные группы разделены по фазам, последовательное соединение катушечных групп в фазе ничем не отличается от такового для обмоток с целым q.

В качестве проверки правильности соединения может служить одинаковое количество «больших» и «малых» катушечных групп в каждой фазе.

При образовании параллельных ветвей необходимо в каждую параллельную ветвь включать идентичные части обмотки, т. е. количество «больших» и «малых» катушечных групп по параллельным ветвям должно быть одинаковым и их относительное расположение в магнитном поле машины должно обеспечивать равные по величине и фазе суммарные э. д. с. каждой параллельной ветви.

Так как на всю фазу приходится по $2p/d$ чередований, то на каждую параллельную ветвь приходится по $2p/a_2d$ чередований.

Для равенства э. д. с. параллельных ветвей величина $2p/a_2d$ должна быть целым числом.

Таким образом, при дробном q выбор числа параллельных ветвей становится более ограниченным, чем при целом, и зависит не только от количества катушечных групп в фазе, но и от величины знаменателя дробности d, так как он определяет число повторяющихся частей обмотки.

Например, в восьмиполюсной машине при целом q можно иметь 1, 2, 4, 8 параллельных ветвей, при дробном q и при $d=2$ 1, 2, 4 параллельные ветви, а при $d=4$ 1, 2 параллельные ветви. При $d=8$ обмотку можно соединить только последовательно. Максимальное число параллельных ветвей в обмотках с дробным q равно числу повторяющихся частей обмотки t. Число параллельных ветвей может быть меньше максимального, если число повторяющихся частей t, деленное на требуемое число параллельных ветвей, будет равно целому числу: $t/a_2=$ целому числу.

Пример. Двигатель имеет 324 паза и 48 полюсов. Определить максимальное и возможное число параллельных ветвей.

1. Число пазов на полюс и фазу

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{324}{3\cdot 48}=2\frac{1}{4}.$$

2. Максимальное число параллельных ветвей

$$t=\frac{2p}{d}=\frac{48}{4}=12.$$

3. Возможное число параллельных ветвей обмотки — 2, 3, 4, 6, так как максимальное число параллельных ветвей 12 делится на любое из этих чисел.

В практике ремонта электродвигателей очень часто приходится соединять схему обмотки в две параллельные ветви.

Различаются два способа соединения: сосредоточенный (с короткими перемычками) и распределенный (с длинными перемычками). При первом способе соединения (рис. 3-17,*а*) все катушечные группы, входящие

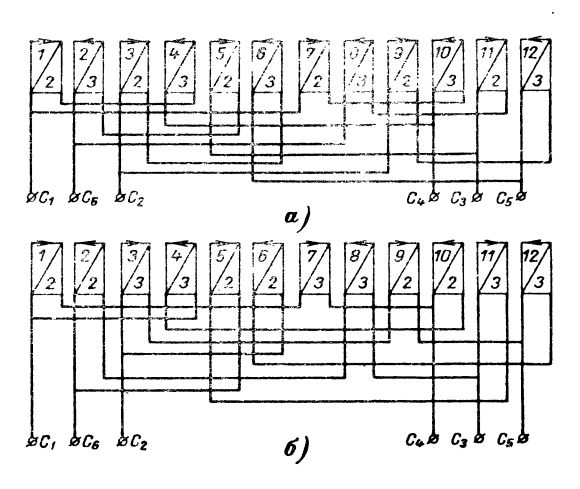


Рис. 3-17. Схема соединения обмотки.

$$2p=4;\quad q=2\frac{1}{2};\quad a_2=2;$$

а — группировка катушечных групп в чередовании 2, 3, 2, 3; *б* — то же 2, 2, 3, 3.

в параллельную ветвь, сосредоточиваются на половине окружности статора. Для соединения в две параллельные ветви по второму способу (рис. 3-17,*б*) надо в первую параллельную ветвь первой фазы включить катушечные группы *1*, *7*, а во вторую параллельную ветвь первой фазы включить катушечные группы *4*, *10*. Аналогично соединяют остальные фазы. Из рис. 3-17,*б* видно, что катушечные группы параллельных ветвей распределены по всей окружности статора.

В асинхронных двигателях, где воздушный зазор очень мал, рекомендуется осуществлять сосредоточенную схему, так как в случае неравномерного зазора возникающий уравнительный ток способствует выравниванию

магнитных сил и ослабляет давление на подшипники [Л. 18].

В синхронных машинах, где воздушный зазор сравнительно велик, нарушение соосности статора и ротора не приводит к образованию опасных магнитных сил, создающих давление на подшипники. Поэтому здесь рекомендуется применять распределенную схему соединения параллельных ветвей.

Достоинством распределенных параллельных ветвей является то, что токи в них всегда одинаковы вне зависимости от состояния воздушного зазора. Но, разумеется, такое соединение не способствует выравниванию магнитных сил взаимодействия ротора со статором при смещении зазора. Поэтому в некоторых синхронных машинах (особенно в гидрогенераторах вертикального исполнения), где условия монтажа и эксплуатации не могут предотвратить значительных изменений воздушного зазора, применяют, как в асинхронных машинах, сосредоточенные параллельные ветви.

Таким образом, при составлении схемы обмотки какой-либо конкретной электрической машины следует выбрать тот или иной способ образования параллельных ветвей в зависимости от параметров обмотки, конструкции механических узлов и предполагаемых эксплуатационных условий.

Составление распределенной схемы в две параллельные ветви для обмотки с целым q не представляет никаких затруднений. В обмотках же с дробным q такое соединение возможно при определенном соотношении числа полюсов $2p$ и знаменателя дробности d.

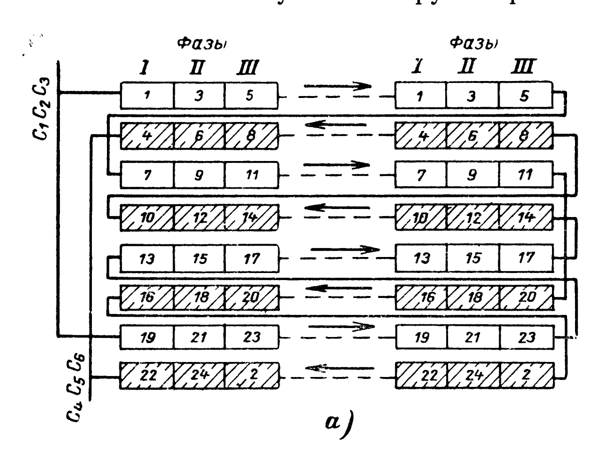
Ниже будут рассмотрены некоторые примеры соединения обмоток в две параллельные ветви в зависимости от $2p$ и d.

1) $2p=4$; условие выполнимости

$$\frac{2p}{a_2 d}=\frac{2p}{2d}=\frac{p}{d} \text{ равно целому числу.}$$

Таким образом, при $2p=4$ симметричная обмотка в две параллельные ветви получается только в том случае, если знаменатель дробности $d=2$, т. е. при $q=1\frac{1}{2}$; $2\frac{1}{2}$ и т. д.

На рис. 3-18, *а* дана упрощенная схема обмотки двигателя $2p=4$; $q=2\frac{1}{2}$; $a_2=2$. Группировка катушечных групп обмотки будет 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3, 2, 3. Так как «большие» и «малые» катушечные группы расположены



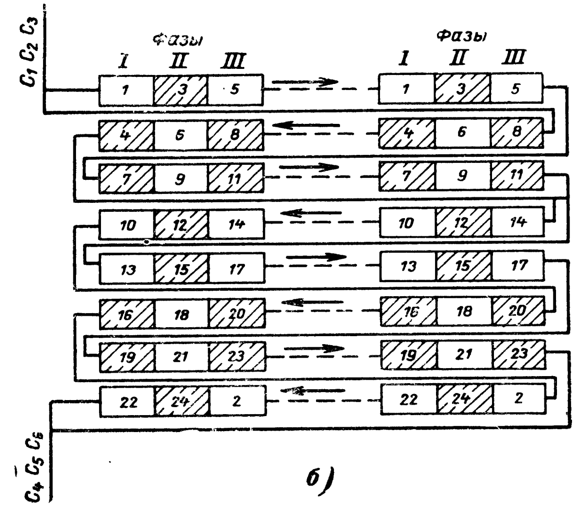


Рис. 3-18. Схема соединения обмотки.

$2p=8$; $q=1\frac{1}{2}$; $a_2=2$.

а — группировка катушечных групп в чередовании 2, 3, 2, 3; *б* — то же 2, 2, 3, 3.

рядом, параллельную ветвь можно составить из соседних катушечных групп. Это исключает возможность соединения их через одну, что является целесообразным с точки зрения уравнительных токов, возникающих в пареллельных ветвях вследствие неравномерности воздушного зазора. Поэтому в этом случае лучше применить другую группировку катушечных групп, а именно: 2, 2, 3, 3, 2, 2, 3, 3, 2, 2, 3, 3.

Такая группировка равноценна с точки зрения распределения равного количества катушек по фазам и дает возможность включать катушечные группы в две параллельные ветви длинными перемычками через одну группу (распределенная схема, рис. 3-17,*б*).

2) При $2p=6$ можно образовать две параллельные ветви в том случае, если знаменатель дробности равен 3, так как выражение $\frac{2p}{a_2 d}=\frac{2p}{2d}=\frac{3}{d}$ равно целому числу при $d=3$. Как известно, в обмотках с дробным числом пазов на полюс и фазу при знаменателе дробности d, равном или кратном 3, обмотка получается несимметричной. Следовательно, в шестиполюсных машинах соединение в две параллельные ветви можно выполнить в виде несимметричной обмотки.

3) При $2p=8$

$$\frac{2p}{a_2 d}=\frac{8}{2d}=\frac{4}{d} \text{ равно целому числу.}$$

Это условие может быть выполнено при $d=2$ или 4.

Рассмотрим каждый случай в отдельности.

а) $2p=8$; $d=2$; $q=1\frac{1}{2}$

В этом случае чередование катушечных групп будет иметь вид:
1, 2, 1, 2, 1, 2 и т. д.

При таком чередовании «большие» катушечные группы чередуются с «малыми». В отличие от обмотки, имеющей четыре полюса, где возможно выполнение параллельных ветвей только рядом лежащими катушечными группами, в обмотке, имеющей восемь полюсов при соединении ее в две параллельные ветви, возможны различные варианты.

Каждая параллельная ветвь образуется соединением рядом лежащих катушечных групп. Такой вид соедине-

ния является самым простым для выполнения. Однако, как это уже отмечалось, при таком соединении возможно возникновение уравнительных токов.

Включение катушечных групп через одну здесь недопустимо, так как в одну параллельную ветвь попадут все «малые» катушечные группы, а в другую — «большие».

Поэтому для равномерного распределения катушечных групп параллельных ветвей в фазах в одну ветвь включают катушечные группы *1*, *7*, *10* и *16*, а в другую *4, 13, 19, 22*.

Это же соединение можно выполнить несколько иначе, не меняя расположения катушечных групп в параллельных ветвях, так, как это показано на рис. 3-18. Обе схемы равноценны и предпочтительней с точки зрения уравнительных токов в параллельных ветвях. Однако, как видно из рис. 3-18, некоторые катушечные группы в схеме соединяются в фазах через две группы. Это приводит к увеличению длины межгрупповых соединений, дополнительному расходу меди и изоляционных материалов, а также может создать дополнительные трудности при их размещении. Если группировку катушечных групп производить так же, как и предыдущем случае, то этих недостатков можно избежать. Группировка катушечных групп всей обмотки примет вид: 1, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 2.

На рис. 3-18,*б* дана схема согласно данной группировке, где «большие» катушечные группы заштрихованы. Из рисунка видно, что катушечные группы соединены через одну, а межгрупповые соединения имеют одинаковую длину.

б) $2p=8$; $d=4$; $a_2=2$; $q=1\frac{1}{4}$.

Чередование катушечных групп в обмотке будет: 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2.

В этом случае каждая параллельная ветвь образуется катушечными группами, состоящими из одной «большой» и трех «малых». Здесь параллельные ветви можно образовать только рядом лежащими катушечными группами. Схема такой обмотки дана на рис. 3-16.

4) При $2p=10$

$$\frac{2p}{a_2 d}=\frac{10}{2d}=\frac{5}{d}.$$

Обмотку в две параллельные ветви можно выполнить только при знаменателе $d=5$, т. е. при $q=1\frac{1}{5}$; $2\frac{1}{5}$; $2\frac{2}{5}$ и т. д. Для электродвигателя с $q=2\frac{2}{5}$; $a_2=2$; $2p=10$ получим следующие значения: $b=2$; $b+1=3$; $c=2$; $d=5$.

Определим группировку катушечных групп внутри чередования. Так как в этом случае $\frac{c}{d}=\frac{d-1}{2d}$; то группировка

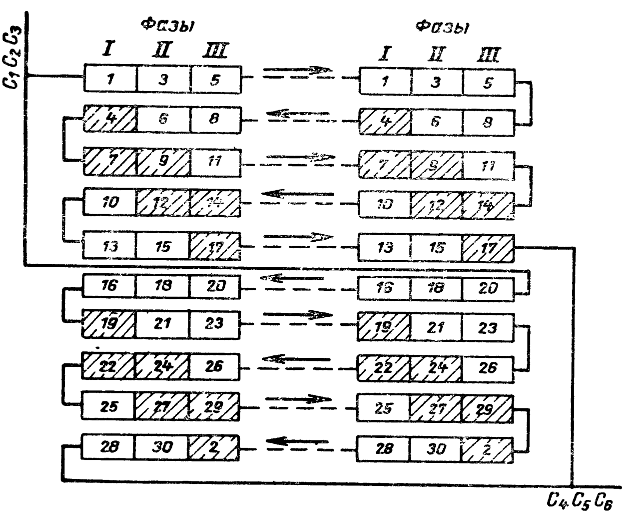


Рис. 3-19. Схема соединения обмотки.

$2p=10$; $q=2\frac{2}{5}$; $a_2=2$.

катушек внутри чередования примет вид: 2, 3, 2, 3, 2, а группировка всей обмотки будет: 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2, 2, 3, 2, 3, 2.

На рис. 3-19 дано расположение «больших» и «малых» катушечных групп (большие катушечные группы заштрихованы) в схеме, из которой видно, что параллельные ветви могут быть образованы только рядом лежащими катушечными группами.

Пользуясь тем, что для выполнения параллельных ветвей в обмотках с дробным числом пазом на полюс и

Таблица 3-4

Число параллельных ветвей	Возможное значение d при числе полюсов												
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28
2	2	3	2; 4	5	2; 3; 6	7	2; 4; 8	3; 9	2; 5; 10	2; 11	2; 3; 4; 6; 12	2; 13	2; 7; 14
3	—	2	—	—	2; 4	—	—	2; 3; 6	—	—	2; 4; 8	—	—
4	—	—	2	—	3	—	2; 4	—	5	—	—	—	—
5	—	—	—	2	—	—	—	—	2; 4	—	—	—	—
6	—	—	—	—	2	—	—	3	—	—	2; 4	—	—

Примечание. При знаменателе дробности d, равном и кратном трем, образуется несимметричная обмотка.

фазу величина $2p/a_2d$=целому числу, легко определить возможное число параллельных ветвей при различных значениях $2p$ и d. Расчетные величины даны в табл. 3-4.

Глава четвертая

НЕСИММЕТРИЧНЫЕ ДВУХСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ С ДРОБНЫМ q

4-1. УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ОБМОТОК

В отличие от симметричных обмоток с дробным q, где э. д. с. всех фаз равны между собой и углы между ними одинаковы, в несимметричных обмотках эти условия не соблюдаются.

Различают два типа несимметричных петлевых обмоток:

1. Знаменатель дробности d равен или кратен трем.
2. Число пазов двигателя z не кратно числу фаз m.

Поскольку электромашиностроительные заводы выпускают двигатели с числом пазов статора, кратным числу фаз, практически второй тип обмотки может встретиться крайне редко, только в случае перемотки двухфазного

двигателя на трехфазный. Поэтому в этом разделе рассматривается только первый тип несимметричных обмоток.

В обмотке с дробным числом пазов на полюс и фазу при d, равном или кратном трем, нет таких двух катушечных групп, фазные углы и э. д. с. которых отличались бы на 120 *эл. град*. В этом случае составление симметричной схемы трехфазной обмотки невозможно.

Пример. Рассмотрим трехфазную 12-полюсную несимметричную обмотку и сравним ее с симметричной.

а) Несимметричная обмотка:

$$z = 42;\ 2p = 12;\ q = \frac{z}{2pm} = \frac{42}{12 \cdot 3} = \frac{7}{6} = 1\frac{1}{6}.$$

Угол между двумя пазами в электрических градусах равен:

$$\alpha = \frac{60}{q} = \frac{60 \cdot 6}{7} = 51\frac{3}{7}\ \textit{эл. град}.$$

б) Симметричная обмотка:

$$z = 45;\ 2p = 12;\ q = \frac{z}{2pm} = \frac{45}{12 \cdot 3} = 1\frac{1}{4} = \frac{5}{4}.$$

Угол между двумя пазами равен:

$$\alpha = \frac{60}{q} = \frac{60 \cdot 4}{5} = 48\ \textit{эл. град}.$$

Используя паз *1* как начало, получим величину углов между пазом *1* и последующими пазами, которые даны в табл. 4-1.

Как видно, из табл. 4-1, при несимметричной обмотке нет таких пазов, фазные углы которых отличались бы на 120 *эл. град,* в то время как в симметричной обмотке пазы с номерами *6*, *11* и *16* различаются друг от друга на 120 *эл. град.*

В двигателях с несимметричной обмоткой под действием разности углов э. д. с. между фазами проходит уравнительный ток, величина которого зависит от степени несимметрии. Уравнительный ток может явиться причиной дополнительного нагрева обмотки, вибрации машины, повышенного шума. Недостатки электродвигателей с несимметричной обмоткой заставляют электромашиностроительные заводы отказываться от их изготовления.

Таблица 4-1

Несимметричная обмотка		Симметричная обмотка		Несимметричная обмотка		Симметричная обмотка	
№ пазов	Углы, *эл. град*	№ пазов	Углы, *эл. град*	№ пазов	Углы, *эл. град*	№ пазов	Углы, *эл. град*
1	0	1	0	19	$205\frac{5}{7}$	19	144
2	$51\frac{3}{7}$	2	48	20	$257\frac{1}{7}$	20	192
3	$102\frac{6}{7}$	3	96	21	$308\frac{4}{7}$	21	240
4	$154\frac{2}{7}$	4	144	22	360	22	288
5	$205\frac{5}{7}$	5	192	23	$51\frac{3}{7}$	23	336
6	$257\frac{1}{7}$	6	240	24	$102\frac{6}{7}$	24	24
7	$308\frac{4}{7}$	7	288	25	$154\frac{2}{7}$	25	72
8	360	8	336	26	$205\frac{5}{7}$	26	120
9	$51\frac{3}{7}$	9	24	27	$257\frac{1}{7}$	27	168
10	$102\frac{6}{7}$	10	72	28	$308\frac{4}{7}$	28	216
11	$154\frac{2}{7}$	11	120	29	360	29	264
12	$205\frac{5}{7}$	12	168	30	$51\frac{3}{7}$	30	302
13	$257\frac{1}{7}$	13	216	31	$102\frac{6}{7}$	31	360
14	$308\frac{4}{7}$	14	264	32	$154\frac{2}{7}$	32	48
15	360	15	312	33	$205\frac{5}{7}$	33	96
16	$51\frac{3}{7}$	16	360	34	$257\frac{1}{7}$	34	144
17	$102\frac{6}{7}$	17	48	35	$308\frac{4}{7}$	35	192
18	$154\frac{2}{7}$	18	96	36	360	36	240

Несимметричная обмотка		Симметричная обмотка		Несимметричная обмотка		Симметричная обмотка	
№ пазов	Углы, *эл. град*	№ пазов	Углы, *эл. град*	№ пазов	Углы, *эл. град*	№ пазов	Углы, *эл. град*
37	$51\frac{3}{7}$	37	288	40	$205\frac{5}{7}$	40	120
38	$102\frac{6}{7}$	38	24	41	$257\frac{1}{7}$	41	168
39	$154\frac{2}{7}$	39	72	42	$308\frac{4}{7}$	42	216
						43	264
						44	312
						45	360

Однако такие обмотки иногда по тем или иным причинам изготавливаются машиностроительными заводами.

В некоторых случаях при ремонте возникает необходимость переделки обмотки на другую скорость вращения, при этом обмотка может получиться несимметричной.

Например, симметричная обмотка двигателя, имеющего 48 пазов и число полюсов $2p=4$, при перемотке на число полюсов, равное 6, получается несимметричной, так как знаменатель дробности d равен трем:

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{48}{3\cdot 6}=2\frac{2}{3}.$$

Следует отметить, что в ряде случаев при небольшой асимметрии несимметричная трехфазная обмотка может оказаться более рациональной и выгодной, чем симметричная. Дело в том, что несимметричные обмотки позволяют получить значение q с высокой степенью дробности для машин с числом пар полюсов, кратным трем, у которых при симметричной обмотке трудно получить высокую степень дробности.

Выполнение схем несимметричных обмоток имеет некоторые особенности:

1. Усложняется группировка катушечных групп по фазам.

2. Ограничивается число параллельных ветвей.

3. Сопряжение фаз несимметричных обмоток рекомендуется производить в звезду.

Выполнять несимметричную обмотку можно лишь в случае, если степень несимметрии находится в допустимых пределах.

Асимметричность обмотки определяется разностью между линейными напряжениями и их средним значением, полученным расчетным путем, а также отклонением по углу между фазами.

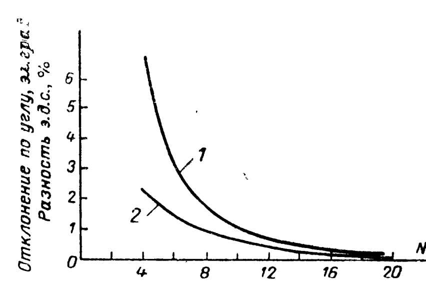


Рис. 4-1. График отклонения по углу (кривая *1*) в зависимости от N и по напряжению (кривая *2*).

Необходимость определения отклонений фазных углов от 120° вызывается тем, что при малой асимметрии фазных величин асимметрия линейных величин также мала. В то же время малая асимметрия линейных величин может быть и при большой асимметрии фазных э. д. с. Это обстоятельство вызывает необходимость нормирования допустимого отклонения по углу.

В настоящее время не существует общепринятых норм допустимой асимметрии обмотки. Однако установлено, что для двигателя с обмоткой, соединенной в звезду, допустимым пределом является: отклонение по углу 2—3 *эл. град* (от идеального направления фазового вектора при 120-градусной звезде э. д. с.) и 2—3% по величине между э. д. с. фаз обмотки.

Степень асимметрии несимметричных обмоток зависит от числителя дроби числа q, выраженного в форме N/d. Чем больше N, тем степень несимметрии меньше. Так, например, обмотка, где $N/d=5/3$, имеет большую несимметрию, чем обмотка, где $N/d=7/3$.

Несимметрию удобно определять по данным табл. 4-2. В этой таблице дано отклонение по величине э. д. с. и фазному углу для трехфазных обмоток с числом пазов, кратным числу фаз, и знаменателем d, равным или кратным трем в зависимости от числителя дроби N [Л. 13]. В соответствии с указанной таблицей на рис. 4-1 даны кривые несимметрии по угля и по э. д. с. в зависимости от N. Из рисунка видно, что кривая отклонения по углу

Таблица 4-2

Числитель N числа q, выраженного в форме N/d*	Разность между э. д. с. фаз C и A в процентах от э. д. с. фазы A (э. д. с. фазы B=э. д. с. фазы A)	Отклонение по углу между э. д. с. фазы A и э. д. с. фазы B и C. *эл. град*	
		C	B
4	2,08	3°18′	6°36′
5	3,09	2°17′	4°34′
7	0,86	1°05′	2°10′
8	1,06	52′	1°44′
10	0,45	32′	1°04′
11	0,58	28′	56′
13	0,28	18′	36′
17	0,20	12′	24′
19	0,14	9′	18′
23	0,10	6′	12′

* N и d не имеют общего множителя.

располагается значительно выше кривой отклонения по напряжению. Следовательно, степень несимметрии следует определять не только по напряжению, но и главным образом по углу. Степень несимметрии по величине э. д. с. будет всегда меньше. Анализируя данные табл. 4-2 и кривые на рис. 4-1, можно сделать вывод, что несимметричная обмотка может быть выполнена при $N=6$ и более, в этом случае отклонение по углу равно 3^c, а по э. д. с. 1,5%, что вполне допустимо.

4-2. ГРУППИРОВКА КАТУШЕЧНЫХ ГРУПП

Рассмотрим группировку катушечных групп несимметричных обмоток на следующем примере.

$z=48;\ 2p=6;\ p=3;$

$$q=\frac{z}{2pm}=\frac{48}{3\cdot 6}=2\frac{2}{3}=\frac{8}{3};\quad b=2;\ b+1=3;\ c=2;\ d=3;$$

$N=8.$

Из табл. 4-2 видно, что несимметрия по углу равна 1°44′ (*эл. град*), несимметричная э. д. с. равна 1,06%, следовательно, такая обмотка практически допустима.

Определим количество «больших» и «малых» катушечных групп:

$$A = 6p = 6 \cdot 3 = 18; \; A_б = A\frac{c}{d} = 18\frac{2}{3} = 12;$$

$$A_м = A\frac{d-c}{d} = 18\frac{3-2}{3} = 6.$$

Как было показано ранее при $d-c=1$, «малые» катушечные группы, имеющие b последовательно соединенных катушек, располагаются в чередовании через $d-1$ «больших» катушечных групп, имеющих $(b+1)$ последовательно соединенных катушек.

Применяя это правило к определению группировки катушечных групп, получаем:

2, 3, 3, 2, 3, 3, 2, 3, 3, 2, 3, 3, 2, 3, 3, 2, 3, 3.

Для разбивки катушечных групп по фазам составим табл. 4-3 с учетом чередования фаз и определим, какое количество катушек попадает в каждую фазу в зависимости от этой группировки.

При рассмотрении табл. 4-3 видно, что в фазу I попали катушечные группы с двумя последовательно соединенными катушками, в фазу II и III — катушечные группы с тремя последовательно соединенными катушками.

Двигатель, намотанный таким образом, работать не будет и сгорит.

Из рассмотренного примера видно, что группировку катушечных групп несимметричных обмоток нельзя производить, пользуясь правилами, установленными для симметричных обмоток. В отличие от симметричных обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу, где для определения группировки катушечных групп достаточно установить группировку одного чередования, состоящего из d катушечных групп, и повторить его

№ катушечных групп	1	2	3	4	5	6	7
Количество последовательно соединенных катушек	2	3	3	2	3	3	2
Чередование фаз	I	III	II	I	III	II	I

$6p/d$ раз, в несимметричных обмотках это условие не соблюдается.

Дело в том, что последовательность «больших» и «малых» катушечных групп, полученная для d полюсов, не будет представлять собой m повторяющихся (по числу фаз) одинаковых частей, и следовательно, не обеспечивает расположение равного числа катушек по фазам.

Для того чтобы число соединенных катушек по фазам было одинаковым, следует рассмотреть группировку md катушечных групп, которая в этом случае является чередованием. Число чередований $N_{ч.н}$ в трехфазной обмотке:

$$N_{ч.н} = \frac{2p}{d}. \tag{4-1}$$

Для выполнения этого условия при группировке катушечных групп несимметричных обмоток можно воспользоваться методом равномерной раскладки «больших» и «малых» катушечных групп по фазам.

Суть этого метода заключается в том, что нам всегда известно число «малых» и «больших» катушечных групп обмотки, которые необходимо расположить в чередовании равномерно так, чтобы в каждой фазе было одинаковое количество тех и других. Как было сказано выше, несимметричные обмотки получаются в том случае, когда d равно или кратно трем.

а) $d=3$. Могут быть два варианта: $c/d=1/3$ и $c/d=$ $=2/3$.

Определим число «больших» и «малых» катушечных групп при $c/d=1/3$:

$$A_б = \frac{1}{3}\cdot 6p = 2p;$$

$$A_м = A - A_б = 6p - 2p = 4p.$$

$$\frac{c}{d} = \frac{2}{3};\ A_б = \frac{2}{3}\cdot 6p = 4p;\ A_м = 6p - 4p = 2p.$$

Таблица 4-3

8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
3	3	2	3	3	2	3	3	2	3	3
III	II	I	III	II	I	III	II	I	III	II

Следовательно, в обоих вариантах задача сводится к тому, чтобы $2p$ катушечных групп одного типа («малых» или «больших») сгруппировать с $4p$ катушечными группами другого типа таким образом, чтобы общее число катушек в каждой фазе было одинаковым.

Как известно, каждый полюс двигателя образуется тремя фазами или же тремя катушечными группами, принадлежащими различным фазам. Эти катушечные группы, могут иметь различное число последовательно соединенных катушек, т. е. если катушечная группа, принадлежащая одной фазе, имеет b последовательно соединенных катушек, то вторая и третья фазы, образующие этот же полюс, могут иметь $b+1$ последовательно соединенных катушек.

Для нахождения группировки катушечных групп чередования очень удобен следующий прием.

Составляют таблицу из d столбиков, каждый столбец делится на три части по числу фаз, где указывается число последовательно соединенных катушек в катушечной группе таким образом, чтобы число катушек в каждой фазе чередования было равно.

Пример. Статор электродвигателя имеет $z=60$ пазов. Число полюсов $2p=6$. Определить группировку катушечных групп.

1) $q=\frac{z}{2pm}=\frac{60}{6\cdot3}=3\frac{1}{3}$; $b=3$; $b+1=4$; $c=1$; $d=3$.

2) Число чередований $N_{\text{ч.н}}=\frac{2p}{d}=\frac{6}{3}=2.$

3) Число „больших“ и „малых“ катушечных групп в чередовании:

$$A_{\text{б.ч}}=\frac{2p}{N_{\text{ч.н}}}=\frac{2\cdot3}{2}=3;\quad A_{\text{м.ч}}=\frac{4p}{N_{\text{ч.н}}}=\frac{4\cdot3}{2}=6.$$

Группировку следует начинать с того типа катушечных групп, которых в чередовании меньше (в нашем случае с «больших»). Таким образом, в каждом полюсе должна быть расположена одна катушечная группа этого типа. Их необходимо распределить равномерно. Из табл. 4-4 видно, что если в первом полюсе «большая» катушечная группа (цифра 4) попала в фазу A, то во втором полюсе помещаем ее в фазу C, а в третьем в фазу B. Оставшиеся свободные места заполняем «малыми» катушечными группами (цифра 3).

Группировка катушечных групп всей обмотки будет иметь следующий вид: 4, 3, 3, 3, 4, 3, 3, 3, 4, 4, 3, 3, 3, 4, 3, 3, 3, 4.

Следует отметить, что приведенная выше группировка катушечных групп является неоднозначным решением этого вопроса.

Таблица 4-4

Расположение катушечных групп	№ полюса								
	1			2			3		
№ катушечных групп	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Фаза	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*
Расположение „больших" катушечных групп в чередовании	4	—	—	—	4	—	—	—	4
Расположение „малых" катушечных групп в чередовании	—	3	3	3	—	3	3	3	—
Группировка катушечных групп в чередовании	4	3	3	3	4	3	3	3	4

Можно найти другие виды группировок, которые совершенно идентичны и приводят к одним и тем же результатам с точки зрения равной разбивки «больших» и «малых» катушечных групп по фазам.

В табл. 4-5 приведены другие варианты группировок, полученных при помощи этого метода.

б) d кратно 3.

Как известно, при d, кратном 3, группировку катушечных групп также нельзя производить обычным способом, как это делается для симметричных обмоток, так как в этом случае, как и при $d=3$, в фазы попадает неравное количество катушек. Следовательно, для того, чтобы произвести группировку катушечных групп при d, кратном 3, воспользуемся тем же методом.

Группировка катушечных групп при $d=6$ ничем не отличается от рассмотренной выше группировки.

Здесь также имеются два варианта.

$$1)\ \frac{c}{d}=\frac{1}{6};\quad 2)\ \frac{c}{d}=\frac{5}{6}.$$

При $\frac{c}{d}=\frac{1}{6}$ $A_б=\frac{1}{6}\cdot 6\,p=p;$

$$A_м=A-A_б=6\,p-p=5\,p.$$

Таблица 4-5

Расположение катушечных групп	№ полюса									№ варианта
	1			2			3			
№ катушечной группы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1
Фаза	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	
Расположение „больших" катушечных групп в чередовании	4	4	4	—	—	—	—	—	—	
Расположение „малых" катушечных групп в чередовании	—	—	—	3	3	3	3	3	3	
Группировка чередования	4	4	4	3	3	3	3	3	3	
Группировка катушечных групп всей обмотки	4, 4, 4, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 4, 4, 4, 3, 3, 3, 3, 3, 3									
Расположение „больших" катушечных групп в чередовании	4	—	—	—	—	4	—	4	—	2
Расположение „малых" катушечных групп в чередовании	—	3	3	3	3	—	3	—	3	
Группировка катушечных групп чередования	4	3	3	3	3	4	3	4	3	
Группировка катушечных групп всей обмотки	4, 3, 3, 3, 3, 4, 3, 4, 3, 4, 3, 3, 3, 3, 4 3, 4, 3									

При $\frac{c}{d} = \frac{5}{6}$ $\quad A_б = \frac{5}{6} 6p = 5p;$

$A_м = 6p - 5p = p.$

Следовательно, в обоих случаях задача сводится к тому, чтобы $5p$ катушечных групп одного типа сгруппировать с p катушечными группами второго типа.

Группировку начинают с того типа катушечных групп, которых в чередовании меньше. На каждую пару полюсов в каждой фазе следует расположить катушечную группу этого типа.

Оставшиеся места заполняются вторым типом катушечных групп.

Пример. Произведем группировку катушечных групп обмотки электродвигателя, имеющего $z=78$ и $2p=12$.

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{78}{12 \cdot 3} = 2\frac{1}{6}; \; b = 2; \; b + 1 = 3; \; c = 1; \; d = 6; \; N = 13.$$

Общее число катушечных групп $A = 6p = 6 \cdot 6 = 36$.

Число чередований $N_{ч.н} = \frac{2p}{6} = \frac{12}{6} = 2$.

Число „больших" и „малых" катушечных групп в чередовании:

$$A_{б.ч} = \frac{cA}{dN_{ч.н}} = \frac{1 \cdot 36}{6 \cdot 2} = 3; \; A_{м.ч} = \frac{d-c}{d} \frac{A}{N_{ч.н}} = \frac{5 \cdot 36}{6 \cdot 2} = 15.$$

Группировка катушечных групп дана в табл. 4-6.

Группировка катушечных групп всей обмотки примет вид:

3, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 2, 2. 2, 3, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 3, 2, 2, 2.

Следует отметить, что эта группировка катушечных групп так же, как и при $d=3$, является не однозначным решением вопроса, и при желании можно найти другие равноценные варианты.

Группировка несимметричных обмоток при $d=9, 12, 15$ и т. д. В случае, если знаменатель дробности $d=9$, 12, 15 и более (в отличие от $d=3$ и $d=6$, для которых имеются только два варианта группировок), количество возможных вариантов увеличивается. Так, при $d=9$ имеется четыре варианта: $^1/_9$, $^2/_9$, $^5/_9$ и $^7/_9$, а при $d=15$ — восемь вариантов.

Выполнение группировки катушечных групп при $d=9$, 12, 15 также не представляет собой никаких труд-

ностей. Если число катушечных групп, «больших» и «малых», кратно или равно числу полюсов, то группировка катушечных групп чередования такой обмотки производится рассмотренным выше способом, как и при $d=6$.

Если же число катушечных групп того или иного типа не кратно числу полюсов, то вначале группируется кратное или равное числу полюсов количество катушечных групп, а затем — оставшееся число катушечных групп этого же типа.

4-3. ВЛИЯНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗНАМЕНАТЕЛЯ ДРОБНОСТИ d НА ФОРМУ КРИВОЙ НАПРЯЖЕНИЯ

На конкретном примере исследуем форму кривой напряжения с помощью звезды пазовых э. д. с.

$$z=42;\ 2p=12;\ q=\frac{z}{2pm}=\frac{42}{12\cdot 3}=1\frac{1}{\underline{6}};\ b=1;$$

$$b+1=2;\ c=1;\ d=6;\ A=6p=6\cdot 6=36;\ A_б=\frac{c}{d}A=$$

$$=\frac{1}{6'}36=6;$$

$$A_м=\frac{d-c}{d}A=\frac{5}{6}\cdot 36=30;\ N_{ч.н}=\frac{2p}{d}=\frac{12}{6}=2;$$

$$A_ч=\frac{A}{N_{ч.н}}=\frac{36}{2}=18;$$

$$A_{б.ч}=\frac{A_б}{N_{ч.н}}=\frac{6}{2}=3;\ A_{м.ч}=\frac{A}{N_{ч.н}}=\frac{30}{2}=15;$$

шаг обмотки:

$$y=0{,}8\ \tau=0{,}8\frac{z}{2p}=0{,}8\frac{42}{12};$$

принимаем $y=3$.

Группировку катушечных групп в чередовании определим из табл. 4-7.

Расположение катушечных групп всей обмотки примет вид:

2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1.

Чередование катушечных групп по фазам:

A — 2, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1; B — 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1; C — 1, 1, 2, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 1, 1, 1.

Таблица 4-6

Расположение катушечных групп	№ полюса																	
	1			2			3			4			5			6		
№ катушечных групп	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Фаза	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*
Расположение „больших“ катушечных групп	3	—	—	—	—	—	—	3	—	—	—	—	—	—	3	—	—	—
Расположение „малых“ катушечных групп	—	2	2	2	2	2	2	—	2	2	2	2	2	2	—	2	2	2
Группировка катушечных групп чередования	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2

Таблица 4-7

Расположение катушечных групп	№ полюса																	
	1			2			3			4			5			6		
№ катушечной группы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Фаза	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*
Расположение „больших“ катушечных групп	2	—	—	—	—	—	—	2	—	—	—	—	—	—	2	—	—	—
Расположение „малых“ катушечных групп	—	1	1	1	1	1	1	—	1	1	1	1	1	1	—	1	1	1
Расположение катушечных групп в чередовании	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1

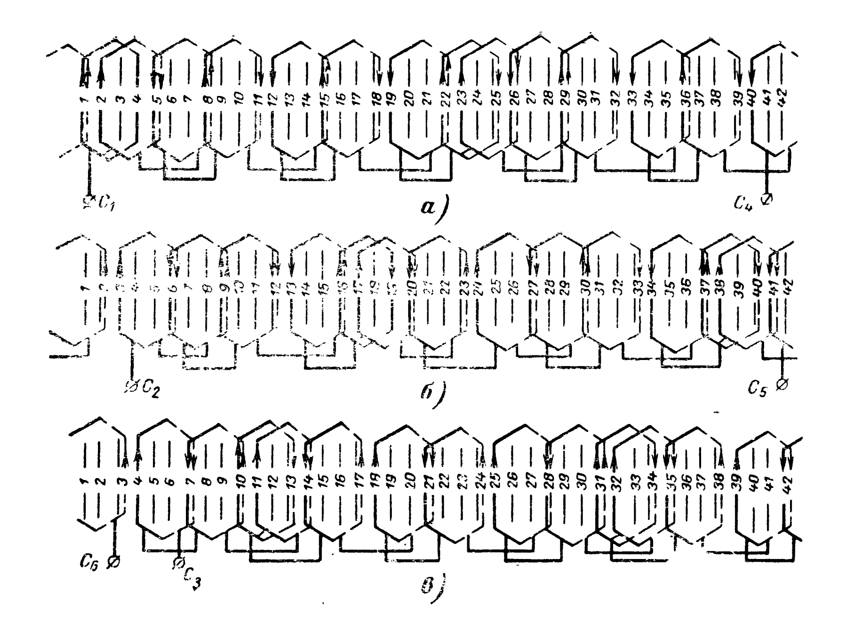


Рис. 4-2.

На рис. 4-2,*а—в* даны схемы обмоток каждой фазы в отдельности, построенные на основании чередований катушечных групп по фазам. Вычертим звезду пазовых э. д. с. для каждой пары полюсов в отдельности, как это сделано на рис. 4-2,*г—и*. Сдвиг между смежными пазами дан в табл. 4-1, каждой паре полюсов соответствует 360 *эл. град*.

Для построения звезды пазовых э. д. с. отложим вектор э. д. с. паза *1* первой катушечной группы в горизонтальном направлении. Затем со сдвигом на угол $51\frac{3}{7}$ *эл. град* откладываем вектор э. д. с. паза *2* и т. д.

Отложив все векторы, строим звезду пазов для первой пары полюсов (рис. 4-2,*г*). Аналогично строим звезду пазовых э. д. с. для остальных пар полюсов.

При построении звезды пазов второй пары полюсов (рис. 4-2,*д*) отметим, что э. д. с. паза *8* (первый вектор второй пары полюсов) совпадает с вектором э. д. с. паза *1*. В симметричных обмотках с дробным *q* вектор *1* 1-й пары полюсов и вектор *1* 2-й пары полюсов не совпа-

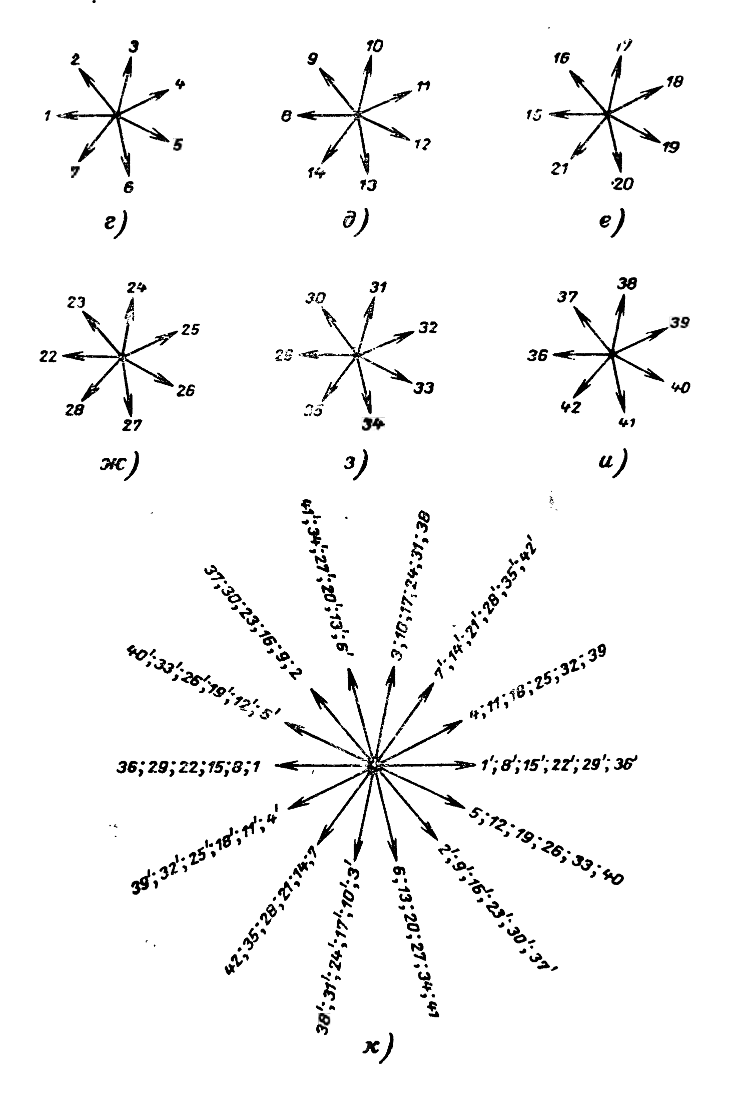


Рис. 4-2. Несимметричная двухслойная обмотка.

$$z = 42;\ 2p = 12;\ q = 1\frac{1}{6}.$$

а — схема фазы *А*; *б* — то же фазы *В*; *в* — то же фазы *С*; *г*, *д*, *е*, *ж*, *з*, *и* — звезды векторов пазовых э. д. с. соответственно 1, 2, 3, 4, 5 и 6-й пары полюсов; *k* — полная звезда векторов пазовых э. д. с. всей обмотки.

дают (рис. 3-14,*б*). Эта особенность несимметричных обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу приводит к тому, что кривая э. д. с. имеет меньшее число ступеней, чем при симметричной обмотке. На рис. 4-3 дан характер изменения кривых пазовых э. д. с. 1-й катушечной группы. При их суммировании (рис. 4-3) получается кривая э. д. с. фазы с четырьмя ступенями вместо семи, как это должно было быть при симметричной обмотке (при $N=7$). Электродвижущая сила остальных катушечных групп (рис. 4-2,*к*) совпадают по фазе с э. д. с. 1-й катушечной группы.

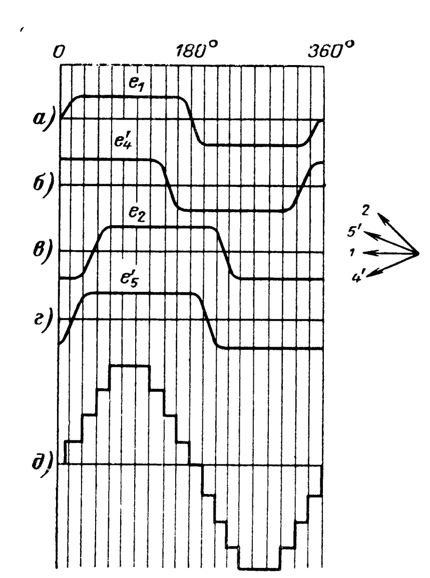


Рис. 4-3. График э. д. с. несимметричной обмотки.

$$z=42;\ 2p=12;\ q=1\frac{1}{6}.$$

а — график э. д. с. паза *1*; *б* — то же паза *4*; *в* — то же паза *2*; *г* — то же паза *5*; *д* — суммарный график э. д. с.

На рис. 4-2,*к* дана полная звезда пазовых э. д. с. Как видно из рисунка, между векторами э. д. с. пазов *1* и *2* располагаются не $(d-1)$ векторов, как это имеет место в симметричных обмотках, а всего лишь один вектор (вектор э. д. с. паза *5*). Можно доказать, что в несимметричных обмотках между векторами соседних пазов располагается $(d/m-1)$ векторов. Угол между двумя векторами в магнитном поле равен:

$$\beta=\frac{180}{N}=\frac{180}{bd+c}.$$

4-4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ И СТЕПЕНИ НЕСИММЕТРИИ

Величина асимметрии несимметричных обмоток при ремонте двигателей с достаточной степенью точности может быть определена по кривой на рис. 4-1. При знаменателе дробности $d=6$ и

выше она находится в пределах допустимых норм. Однако при знаменателе дробности d, равном 3, при $q = 1\frac{1}{3}$ или $1\frac{2}{3}$ несимметрия достигает величины, превышающей допустимые нормы. В отдельных случаях уменьшение несимметрии может быть осуществлено путем исключения некоторых катушек из обмотки или применения нескольких катушек с уменьшенным числом витков. Однако следует иметь в виду, что последний прием может привести к серьезным осложнениям (ошибкам) в случае последующего ремонта такой машины.

Ниже будут изложены способ определения величины и степени несимметрии и методы ее корректировки.

При рассмотрении несимметричных обмоток в случае, когда z/m равно целому числу, а фазы A и B симметрично расположены по отношению фазы C, достаточно только рассчитать угол между фазами A и C, а также значение э. д. с. фаз A и C. Метод определения несимметрии проследим на примере.

Пример. $z = 30;\ 2p = 6;\ q = \frac{z}{2pm} = \frac{30}{3 \cdot 6} = \frac{5}{3} = 1\frac{2}{3}$.

$$A = 6p = 6 \cdot 3 = 18;\ A_б = \frac{c}{d}A = \frac{2}{3} \cdot 18 = 12;$$

$$A_м = \frac{d-c}{d}A = \frac{3-2}{3} \cdot 18 = 6;$$

$$N_{ч.н} = \frac{2p}{d} = \frac{6}{3} = 2;\ A_{б.ч} = \frac{A_б}{N_{ч.н}} = \frac{12}{2} = 6;$$

$$A_{м.ч} = \frac{A_м}{2} = \frac{6}{2} = 3.$$

Диаметральный шаг обмотки

$$y_0 = \tau = \frac{z}{2p} = \frac{30}{6} = 5.$$

Укороченный шаг обмотки

$$y = 0{,}8y_0 = 0{,}8 \cdot 5 = 4.$$

Группировка катушечных групп чередования дана в табл. 4-8.

Группировка катушечных групп всей обмотки примет следующий вид:

вариант 1: 1, 2, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 1;
вариант 2: 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 2, 2, 1, 2, 1, 2, 1, 2, 2, 2;
вариант 3; 1, 2, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 1, 2, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 2.

Отсюда группировка катушечных групп по фазам в зависимости от варианта будет иметь вид:

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
A — 122122	A — 212212	A — 122122
B — 221221	B — 212212	B — 212212
C — 212212	C — 122122	C — 212212

Несмотря на то, что последовательности «больших» и «малых» катушечных групп в чередовании в зависимости от варианта различны, их чередования по фазам идентичны во всех вариантах. При всех комбинациях получаем одинаковые разности между амплитудами э. д. с., а также отклонения по углу между э. д. с.

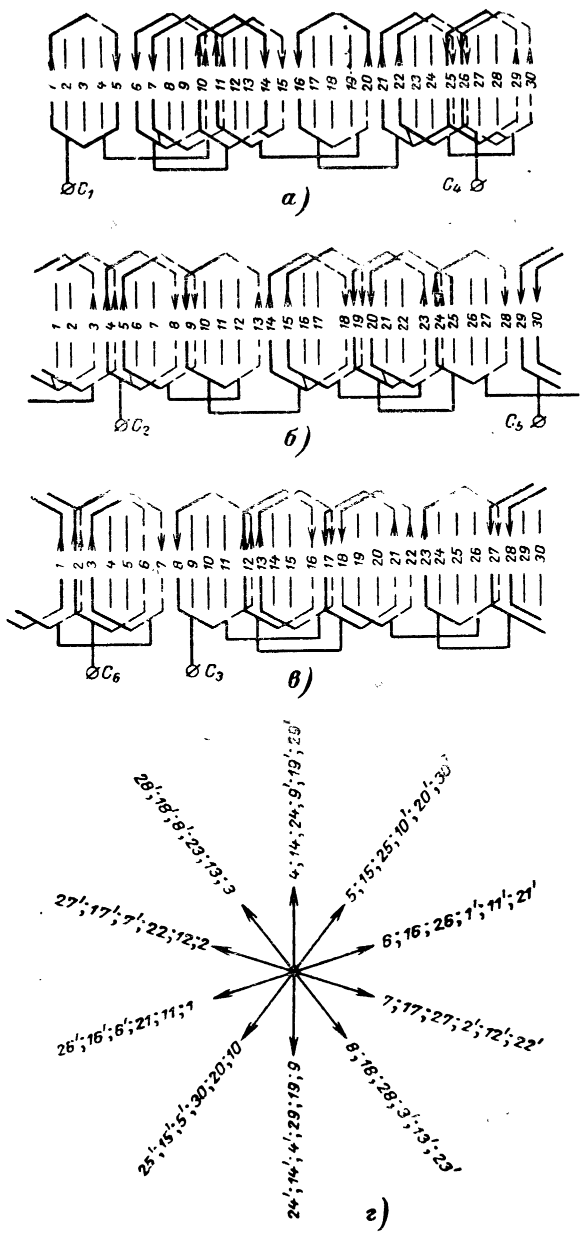
Таблица 4-8

Расположение катушечных групп	№ полюса									№ варианта
	1			2			3			
№ катушечных групп	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Фаза	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	*A*	*C*	*B*	
Расположение „малых" катушечных групп	1	—	—	—	1	—	—	—	1	1-й
Расположение „больших" катушечных групп	—	2	2	2	—	2	2	2	—	1-й
Расположение катушечных групп в чередовании	1	2	2	2	1	2	2	2	1	1-й
Расположение „малых" катушечных групп	—	1	—	1	—	1	—	—	—	2-й
Расположение „больших" катушечных групп	2	—	2	—	2	—	2	2	2	2-й
Расположение катушечных групп в чередовании	2	1	2	1	2	1	2	2	2	2-й
Расположение „малых" катушечных групп	1	—	—	—	1	1	—	—	—	3-й
Расположение „больших" катушечных групп	—	2	2	2	—	—	2	2	2	3-й
Расположение катушечных групп в чередовании	1	2	2	2	1	1	2	2	2	3-й

фаз. На рис. 4-4,*а—в* даны схемы обмоток фаз с чередованием «больших» и «малых» катушечных групп по варианту 3. Теперь построим звезду пазовых э. д. с. для этого варианта. По формуле (4-2) определяем угол сдвига между двумя лучами звезды:

$$\alpha_н = \frac{180}{N} = \frac{180}{5} = 36 \text{ эл. град.}$$

Так как величина $\frac{d}{m} - 1 = \frac{3}{3} - 1 = 0$, то в этом случае между векторами э. д. с. соседних пазов другие векторы пазовых э. д. с. не располагаются.



C1
C4
a)
C2
C5
б)
C6
C3
в)
4; 14; 24; 9'; 19'; 29'
5; 15; 25; 10'; 20'; 30'
6; 16; 26; 1'; 11'; 21'
7; 17; 27; 2'; 12'; 22'
8; 18; 28; 3'; 13'; 23'
24'; 14'; 4'; 29; 19; 9
25'; 15'; 5'; 30; 20; 10
26'; 16'; 6'; 21; 11; 1
27'; 17'; 7'; 22; 12; 2
28'; 18'; 8'; 23; 13; 3
г)

Рис. 4-4.

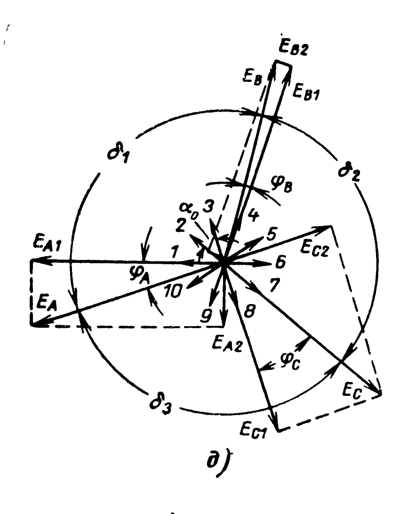


Рис. 4-4. Несимметричная двухслойная обмотка.

$z = 30;\ 2p = 6;\ q = 1\frac{2}{3}.$

а — схема фазы *А*; *б* — то же фазы *В*; *в* — то же фазы *С*; *г* — звезда пазовых э. д. с.; *д* — диаграмма э. д. с. фаз.

За нулевое направление принимаем фазу э. д. с. паза *1*, угол между фазами э. д. с. в остальных пазах определяем из табл. 4-9. Звезда пазовых э. д. с. в соответствии с данными этой таблицы дана на рис. 4-4,*г*.

Порядок соединения катушек обмотки по фазам согласно схеме на рис. 4-4,*а—в* определяется следующим образом:

Фаза *А*	Фаза *В*	Фаза *С*
C_1 → *1 — 5′* →	C_2 → *4 — 8′*	C_3 → *8 — 12′* →
	↙	
← *6 — 10′*	*5 — 9′* →	← *12 — 16′*
↗		↗
7 — 11′ ←	← *9 — 13′* ←	*13 — 17′* ←
→ *10 — 14′*	→ *14 — 18′*	→ *17 — 21′*
↙	↙	↙
11 — 15′ →	*15 — 19′* →	*18 — 22′* →
← *16 — 20′* ←	← *19 — 23′*	← *23 — 27′* ←
	↗	
→ *21 — 25′*	*20 — 24′* ←	→ *27 — 1′*
↙		↙
22 — 26′ →	→ *24 — 28′* →	*28 — 2′* →
C_4 ← *25 — 29′*	C_5 ← *2 — ′*	C_6 ← *2 — 6′*
↗	↗	↗
26 — 30′ ←	*30 — 4′* ←	*3 — 7′* ←

№ пазов	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Угол, *эл. град*	0	36	72	108	144	180	216	252	288	324	0	36	72	108

Дальнейшие расчеты можно упростить, если рассматривать не каждый единичный вектор пазовой э. д. с. в отдельности, а сгруппировав единичные пазовые векторы, совпадающие по направлению и относящиеся к данной фазе. Тогда, если руководствоваться рис. 4-4, группы идентичных векторов в фазах будут такими, как это представлено в табл. 4-10. За нулевое направление в каждой фазе выбрано соответственно направление векторов пазов *1*, *4* и *8*, так как эти направления примерно соответствуют направлениям идеальной 120-градусной звезды фазовых э. д. с. Вообще за нулевое направление фазы можно было бы принять любое другое направление: от этого конечные результаты расчетов не изменятся, лишь только немного усложнится расчет.

Со знаком плюс принимаются номера векторов единичных пазовых э. д. с., сдвинутые в своих фазах по часовой стрелке по отношению пазов *1*, *4*, *8*, а со знаком минус — векторы пазовых э. д. с., сдвинутые против часовой стрелки по отношению к этим же пазам.

Если принять амплитудное значение э. д. с. стороны катушки за единицу, то косинусные и синусные составляющие их (проекции векторов пазовых э. д. с. катушек на оси, проходящие через пазы *1, 4* и *8*, и на оси, перпендикулярные к ним) определяются следующим образом (с учетом группировки идентичных векторов по табл. 4-10):

Для фазы A

$8\cos 0° = 8\times 1 = 8$

$8\cos -36° = 8\times 0{,}809 = 6{,}472$

$2\cos 36° = 2\times 0{,}809 = 1{,}618$

$2\cos -72° = 2\times 0{,}301 = 0{,}602$

$E_{A1} = 16{,}702$

$8\sin 0° = 8\times 0 = 0$

$8\sin -36° = -8\times 0{,}588 = -4{,}704$

$2\sin 36° = 2\times 0{,}588 = 1{,}176$

$2\sin -72° = -2\times 0{,}95 = -1{,}9$

$E_{A2} = -5{,}428$

Для фазы B

$10\cos 0° = 10\times 1 = 10$

$6\cos -36° = 6\times 0{,}809 = 4{,}854$

$4\cos 36° = 4\times 0{,}809 = 3{,}236$

$E_{B1} = 18{,}090$

$10\sin 0° = 10\times 0 = 0$

$6\sin -36° = -6\times 0{,}809 = -3{,}528$

$4\sin 36° = 4\times 0{,}809 = 2{,}352$

$E_{B2} = -1{,}166$

Таблица 4-9

15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
144	180	216	252	288	324	0	36	72	108	144	180	216	252	288	324

Таблица 4-10

Расположение единичных векторов для фаз и углов									
Фаза A				Фаза B			Фаза C		
0°	+36°	—36°	—72°	0°	+36°	—36°	0°	—36°	—72°
1	7	5′	14′	4′	5	8′	8	12′	16′
6	22	10′	29′	9′	15	13′	13	17′	21′
11′		10		9	20	18′	18	12	1′
11		15′		14	30	23′	23	17	6′
16		20′		19′		28′	28	22′	
21		25′		19		3′	3	27′	
26′		25		24′				2′	
26		30′		24				7′	
				4				27	
				29				2	

Для фазы C

$$6 \cos 0° = 6 \times 1 = 6 \qquad 6 \sin 0° = 6 \times 0 = 0$$

$$10 \cos -36° = 10 \times 0{,}809 = 8{,}09 \qquad 10 \sin -36° = -10 \times 0{,}588 = -5{,}88$$

$$4 \cos -72° = 4 \times 0{,}301 = 1{,}24 \qquad 4 \sin -72° = -4 \times 0{,}95 = -3{,}80$$

$$E_{C1} = 15{,}33 \qquad E_{C2} = -9{,}68$$

Значение э. д. с. для фаз A, B, и C:

$$E_A = \sqrt{E_{A1}^2 + E_{A2}^2} = \sqrt{16{,}702^2 + (-5{,}423)^2} = 17{,}68;$$

$$E_B = \sqrt{E_{B1}^2 + E_{B2}^2} = \sqrt{18{,}09^2 + (-1{,}166)^2} = 18{,}1;$$

$$E_C = \sqrt{E_{C1}^2 + E_{C2}^2} = \sqrt{15{,}33^2 + (-9{,}68)^2} = 18{,}1.$$

Среднее значение э. д. с.

$$E_{ср} = \frac{E_A + E_B + E_C}{3} = \frac{17{,}68 + 18{,}1 + 18{,}1}{3} = 17{,}92.$$

Значение угла между э. д. с. фаз A, B и C и осями, проходящими через пазы *1*, *4* и *8*:

$$\operatorname{tg} \varphi_A = \frac{E_{A2}}{E_{A1}} = \frac{5{,}424}{16{,}702} = -0{,}324; \qquad \varphi_A = -18°6';$$

$$\operatorname{tg} \varphi_B = \frac{E_{B2}}{E_{B1}} = \frac{1{,}166}{18{,}09} = -0{,}0644; \qquad \varphi_B = -3°42';$$

$$\operatorname{tg} \varphi_C = \frac{E_{C2}}{E_{C1}} = \frac{-9{,}68}{15{,}33} = -0{,}634; \qquad \varphi_C = -32°30'.$$

Величины отклонения фазных э. д. с. от среднего значения:

$$\Delta E_A = E_A - E_{ср} = 17{,}68 - 17{,}92 = -0{,}24;$$
$$\Delta E_B = E_B - E_{ср} = 18{,}1 - 17{,}92 = 0{,}18;$$
$$\Delta E_C = E_C - E_{ср} = 18{,}1 - 17{,}92 = 0{,}18.$$

Степень несимметрии по э. д. с. надо определять по фазе A, так как она имеет максимальное отклонение от среднего значения:

$$\frac{\Delta E_A}{E_{ср}} \cdot 100 = \frac{0{,}24}{17{,}92} \cdot 100 = 1{,}33\%.$$

Построим звезду э. д. с. трех фаз (рис. 4-4,*д*), откуда определяем углы между фазами:

$$\delta_1 = 3\ \alpha_0 + \varphi_A - \varphi_B = 3 \cdot 36^\circ + 18^\circ 6' - 3^\circ 42' = 122^\circ 24';$$
$$\delta_2 = 4\ \alpha_0 + \varphi_B - \varphi_C = 4 \cdot 36^\circ + 3^\circ 48' - 32^\circ 30' = 115^\circ 18';$$
$$\delta_3 = 3\ \alpha_0 + \varphi_C - \varphi_A = 3 \cdot 36^\circ + 32^\circ 30' - 18^\circ 6' = 122^\circ 24'.$$

Величины отклонения по углу от 120°:

$$\Delta\delta_1 = 120^\circ - 122^\circ 24' = -2^\circ 24';$$
$$\Delta\delta_2 = 120^\circ - 115^\circ 18' = 4^\circ 42';$$
$$\Delta\delta_3 = 120^\circ - 122^\circ 24' = -2^\circ 24'.$$

Степень несимметрии по углу

$$\frac{\Delta\delta_2}{120} \cdot 100 = \frac{4^\circ 42'}{120} \cdot 100 = 3{,}9\%.$$

4-5. УМЕНЬШЕНИЕ АСИММЕТРИИ МЕТОДОМ КОРРЕКТИРОВКИ ОБМОТКИ

В рассмотренном ранее примере мы установили, что степень несимметрии по величине суммарных векторов э. д. с. 1,33% находится в пределах норм. Отклонение по углу 4°42′ является, очевидно, неприемлемым. Однако величина несимметрии может быть значительно уменьшена с помощью корректировки обмотки.

Корректировка может быть произведена несколькими способами. Например, исключением одной или нескольких катушек из некоторых «больших» катушечных групп одной или двух фаз, переключением отдельных катушек из одной фазы в другую. При этом в обоих случаях общее число катушек в разных фазах будет не одинаковым, а степень несимметрии всей обмотки будет уменьшена. Существует также способ перегруппировки катушечных групп внутри одной или двух фаз. В этом случае могут появиться одна или несколько «больших» катушечных групп с числом катушек в них на два (а не на одну, как это имеет место во всех обмотках с дробным *q*) больше, чем в «малых» катушечных группах.

Какой из перечисленных способов выбрать для корректировки той или иной обмотки, следует решать путем анализа звезды пазовых э. д. с. Так, для вышеразобранного примера несимметричной

обмотки с недопустимой степенью несимметрии проведем корректировку путем частичной перегруппировки фазы B с образованием в ней только одной катушечной группы с $b+2$ катушками.

Группировка катушечных групп всей обмотки примет вид:

1, 2, 3, 2, 1, 1, 2, 2, 1, 1, 2, 2, 2, 1, 2, 2. 2, 1.

Приняв за начало отсчета э. д. с. фаз A, B, C пазы *1*, *4*, *27*, составляем табл. 4-11 групп векторов, определенных в соответствии со звездой пазовых э. д. с. рис. 4-4,*г*.

Таблица 4-11

Расположение единичных векторов для фаз и углов											
Фаза A				Фаза B				Фаза C			
0°	+36°	—36°	—72°	0°	+36°	—36	+72	0°	+36°	—36°	+72°
1	7	5′	8	4′	5	8′	6	2	3′	6′	9′
1′	12′	15′		4	10′	23		2′	3	21	14′
11′	12	20′		9′	10	28′		7′	13′		29′
11	22	25		14	15			17′	13		
16	27′	30′		19′	20′			17	18′		
16′				19	25			22	18		
21				24′	30′			27	23		
26′				24					28		
27				29′							

Суммарная величина проекций векторов пазовых э. д. с. на оси, проходящие через пазы *1*, *4* и *27* и перпендикуляры к ним.

Для фазы A

$9\cos 0° = 9\times 1 = 9{,}0$

$5\cos 36° = 5\times 0{,}809 = 4{,}045$

$5\cos -36° = 5\times 0{,}809 = 4{,}045$

$1\cos -72° = 1\times 0{,}95 = 0{,}95$

$E_{A1} = 18{,}04$

$9\sin 0° = 9\times 0 = 0$

$5\sin 36° = 5\times 0{,}588 = 2{,}94$

$5\sin -36° = -5\times 0{,}588 = -2{,}94$

$1\sin -72° = -1\times 0{,}95 = -0{,}95$

$E_{A2} = -0{,}95$

Для фазы B

$9\cos 0° = 9\times 10 = 9{,}0$

$7\cos 36° = 7\times 0{,}809 = 5{,}663$

$3\cos -36° = 3\times 0{,}809 = 2{,}427$

$1\cos 72° = 1\times 0{,}95 = 0{,}95$

$E_{B1} = 18{,}04$

$9\sin 0° = 9\times 0 = 0$

$7\sin 36° = 7\times 0{,}588 = 4{,}116$

$3\sin -36° = -3\times 0{,}588 = -1{,}764$

$1\sin 72° = 1\times 0{,}95 = 0{,}95$

$E_{B2} = 3{,}302$

Для фазы C

$7\cos 0° = 7\times 1 = 7$

$8\cos 36° = 8\times 0{,}809 = 6{,}472$

$2\cos -36° = 2\times 0{,}809 = 1{,}618$

$3\cos 72° = 3\times 0{,}301 = 0{,}903$

$E_{C1} = 15{,}993$

$7\sin 0° = 7\times 0 = 0$

$8\sin 36° = 8\times 0{,}588 = 4{,}704$

$2\sin -36° = -2\times 0{,}588 = -1{,}176$

$3\sin 72° = 3\times 0{,}95 = 2{,}85$

$E_{C2} = 6{,}378$

Значения э. д. с. фаз A, B, и C

$$E_A=\sqrt{E_{A1}^2+E_{A2}^2}=\sqrt{18,04^2+(-0,95)^2}=18,05;$$

$$E_B=\sqrt{E_{B1}^2+E_{B2}^2}=\sqrt{18,04^2+3,302^2}=18,15;$$

$$E_C=\sqrt{E_{C1}^2+E_{C2}^2}=\sqrt{15,993^2+6,378^2}=17,30.$$

Значенич средней величины э. д. с.

$$E_{ср}=\frac{E_A+E_B+E_C}{3}=\frac{18,05+18,15+17,30}{3}=17,8.$$

Значение угла между э. д. с. фаз A, B и C и осями, проходящими через пазы *1*, *4* и *27*:

$$\operatorname{tg}\varphi_A=\frac{E_{A2}}{E_{A1}}=\frac{-0,95}{18,04}=-0,0524;\qquad \varphi_A=-3°;$$

$$\operatorname{tg}\varphi_B=\frac{E_{B2}}{E_{B1}}=\frac{3,302}{18,04}=0,183;\qquad \varphi_B=10°20';$$

$$\operatorname{tg}\varphi_C=\frac{E_{C2}}{E_{C1}}=\frac{6,378}{15,993}=0,398;\qquad \varphi_C=21°40'.$$

Величины отклонения фазных э. д. с. от среднего значения:

$$\Delta E_A=E_A-E_{ср}=18,05-17,8=0,25;$$

$$\Delta E_B=E_B-E_{ср}=18,15-17,8=0,35;$$

$$\Delta E_C=E_C-E_{ср}=17,30-17,8=-0,5.$$

Степень несимметрии по величине фазовых э. д. с. определится из отношения

$$\frac{\Delta E_B}{\Delta E_{ср}}\cdot 100=\frac{0,5}{17,8}\cdot 100=2,8\%.$$

Величина угла сдвига между фазами A, B, C:

$$\delta_1=3\alpha_0+\varphi_A+\varphi_B=108°+3°+10°20'=121°20';$$

$$\delta_2=3\alpha_0-\varphi_B+\varphi_C=108°-10°20'+21°40'=119°20';$$

$$\delta_3=4\alpha_0-\varphi_A-\varphi_C=144°-3°-21°40'=119°20'.$$

Величина отклонения по углу от 120°:

$$\Delta\delta_1=120°-121°20'=-1°20';$$

$$\Delta\delta_2=120°-119°20'=40';$$

$$\Delta\delta_3=120°-119°20'=40'.$$

Степень несимметрии по углу фазовых векторов определится из соотношения

$$\frac{\Delta\delta_1}{120}\cdot 100=\frac{1°20'}{120}\cdot 100=1,08\%.$$

Таблица 4-12

$\frac{c}{d}$	Группировка катушечных групп в чередовании
1/3	1 0 0 0 0 1 0 1 0
2/3	1 0 1 0 1 1 1 1 0
1/6	1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0
5/6	1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 0
1/9	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0
2/9	1 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0
4/9	1 0 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 0
5/9	1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 0 1 0 1 0 1 0 1 0 1 1 0 1 0
7/9	1 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1 1 1 0
8/9	1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0

При сравнении величины несимметрии некорректированной обмотки с корректированной видно, что максимальная величина несимметрии по напряжению увеличилась с 1,33 до 2,8%, но зато несимметрия по углу снизилась с 4°48′ до 1°20′ и находится в пределах нормы. Так как углы между двумя векторами пазовых э. д. с. в несимметричных обмотках $\alpha = 180/N$, то несимметрия обмоток с z/m, равным целому числу, выполненных для максимального коэффициента распределения основной гармоники, зависит от величины N.

Несимметрия некорректированной обмотки равна постоянной величине для различных значений q с одним и тем же значением N и одинакова для $q = 1\frac{4}{9}$ и $q = 4\frac{1}{3}$. Поэтому корректировку обмотки следует производить при $q = 1\frac{1}{3}$ $(N = 4)$ и $q = 1\frac{2}{3}$ $(N=5)$. При $q = 1\frac{1}{6}$ $(N = 7)$, $q = 2\frac{1}{3}$ $(N = 7)$ и выше обмотку можно не корректировать, так как при $N=7$ и выше на основании табл. 4-2 несимметрия по величине э. д. с. и по углу находится в пределах норм.

Группировка катушечных групп чередования в зависимости от дробной части c/d при $b=0$ дана в табл. 4-12.

Глава пятая

РАСЧЕТЫ ОБМОТОК

5-1. ТИПИЧНЫЕ СЛУЧАИ РАСЧЕТА ОБМОТОЧНЫХ ДАННЫХ ПРИ РЕМОНТЕ

При ремонте электродвигателей с перемоткой сгоревшей обмотки задача чаще всего сводится к сохранению фирменных данных и параметров обмотки. Однако обмоточные данные, записанные при демонтаже сгоревшей

обмотки, могут оказаться ошибочными вследствие неправильного выполнения при предыдущем ремонте, что, в частности, и могло послужить причиной выхода машины из строя. Во избежание повторения ошибок при ремонте необходимо обмоточные данные каждого электродвигателя, поступающего на перемотку, подвергнуть электрическому расчету. В отличие от расчетов, производимых на электромашиностроительных заводах, где решаются вопросы геометрии машин — профилирование сердечника, выбор наиболее выгодных соотношений основных размеров — при ремонте расчет производится при наличии готового сердечника. Поэтому в большинстве случаев задача сводится к определению числа эффективных проводников и их сечения, при котором получается наилучшее соотношение между магнитными и электрическими нагрузками.

Если число витков в обмотке слишком мало, то магнитные нагрузки будут чрезмерно велики, а электрические (при данной мощности) — недостаточны, и наоборот. Должно существовать какое-то среднее значение числа витков и их сечения, дающее оптимальные величины магнитных и электрических нагрузок.

Таким образом, задачей поверочного расчета является нахождение оптимальных величин при данных размерах магнитопровода (сердечника статора и ротора).

В практике ремонта встречаются следующие случаи расчета:

1. Перемотка электродвигателя без изменения его параметров (паспортная табличка, а также старая обмотка сохранились).

2. Перемотка электродвигателя на другое напряжение. Параметры до перемотки известны.

3. Перемотка электродвигателя с изменением скорости вращения и мощности. Определение оптимальных параметров при новой скорости вращения.

4. Определение оптимальных параметров в случае отсутствия старой обмотки. Ее технические данные не известны, а также отсутствует паспортная табличка.

5. Расчет обмоточных данных, связанных с модернизацией электродвигателя (повышение мощности), вызванной применением проводниковых материалов с более тонкой изоляцией (эмаль провода) или с применением более теплостойкой изоляции, а также с повышением магнитных нагрузок.

6. Расчет обмоточных данных, связанный с изменением материала обмоточного провода (вместо медных проводов необходимо применить алюминиевые и наоборот).

7. Пересчет электродвигателя с фазным ротором на короткозамкнутый.

Правильность расчета и окончательная мощность по пп. 4 и 5 может быть определена только после испытания электродвигателя.

Подготовка к расчету. Для расчета или пересчета ремонтируемых электродвигателей необходимо произвести следующие подготовительные работы:

I. Определить старые обмоточные данные.

II. Произвести обмер активной стали статора и ротора.

III. Определить расчетные величины на основании обмера.

I. Старые обмогочные данные статора и ротора

1. Сопряжение фаз (звезда, треугольник).

2. Тип обмотки (однослойная, двухслойная, цепная и т. д.).

3. Число катушечных групп в фазе и их соединение.

4. Число катушек в катушечной группе статора и ротора (для определения q и $q_р$).

5. Общее число эффективных проводов на паз статора $w_{п.эф}$ и ротора $w_{п.р.эф}$.

6. Число параллельных проводов в активном витке статора a_1, ротора $a_{1р}$.

7. Число параллельных ветвей статора a_2, ротора $a_{2р}$.

8. Размеры и марка провода.

9. Размеры вылета лобовых частей обмотки статора и ротора и расстояние от обмотки до крышек.

10. Шаг обмотки статора y, ротора $y_р$.

Все эти данные определяются по старой обмотке.

II. Обмер активной стали статора и ротора

1. Внутренний диаметр расточки стали: статора $D_в$, ротора $D_{в.р}$.

2. Наружный диаметр активной стали: статора $D_н$, ротора $D_{н.р}$.

3. Высота спинки: статора $h_а$, ротора $h_{а.р}$.

4. Высота зубца: статора h_z, ротора $h_{zр}$.

5. Полная высота паза: статора $h_{п}$, ротора $h_{п.р}$.

6. Высота паза до клина $h_{п.к}$, ротора $h_{п.к.р}$.

7. Ширина паза: статора $b_{п}$, ротора $b_{п.р}$.

8. Ширина паза в широкой части: статора $b'_{п}$, ротора $b'_{п.р}$.

9. Ширина паза в узкой части: статора $b''_{п}$, ротора $b''_{п.р}$.

10. Ширина зубца с параллельными стенками: статора b_z, ротора $b_{zр}$.

11. Минимальная ширина зубца: статора b'_z, ротора $b'_{zр}$.

12. Максимальная ширина зубца: статора b''_z, ротора $b''_{zр}$.

13. Ширина шлица: статора $b_{ш}$, ротора $b_{ш.р}$.

14. Полная длина активной стали: статора l, ротора $l_р$.

15. Число пазов: статора z, ротора $z_р$.

16. Число поперечных вентиляционных каналов: статора $n_{к}$, ротора $n_{к.р}$.

17. Ширина вентиляционных каналов: статора $b_{к}$, ротора $b_{к.р}$.

18. Число продольных вентиляционных каналов: статора $m_{к}$, ротора $m_{к.р}$.

19. Диаметр продольных вентиляционных каналов: статора $d_{к}$, ротора $d_{к.р}$.

20. Воздушный зазор между статором и ротором δ.

21. Диаметр конца вала $d_{в}$.

III. Определение расчетных величин на основании обмера

1. Расчетная длина активной стали статора

$$l_i = l - \frac{2}{3} n_{к} b_{к}, \text{ см}. \tag{5-1}$$

При отсутствии поперечных вентиляционных каналов $l_i = l_0$.

2. Длина активной стали статора без вентиляционных каналов

$$l_{ж} = l - n_{к} b_{к}, \text{ см}. \tag{5-2}$$

3. Чистая длина активной стали статора

$$l_0 = l_{ж} k_{ж} = (l - n_{к} b_{к})\, k_{ж}, \text{ см}. \tag{5-3}$$

где $k_ж$ — коэффициент, учитывающий уменьшение длины активной стали в результате изоляционного покрытия листов, берется из табл. 5-1.

Таблица 5-1

Толщина листов стали $\Delta_{ст}$, *мм*	Коэффициент $k_ж$		
	Род изоляции		Без изоляции
	Бумага	Лак	
0,5	0,90	0,93	0,95
0,35	0,87	0,87	0,93

4. Наружный диаметр статора и ротора. Если его нельзя замерить, то определяют по формуле

$$D_н = D_в + 2h_a + 2h_z,\ см, \quad (5\text{-}4)$$

$$D_{н.р} = D_в - 2\delta,\ см. \quad (5\text{-}5)$$

5. Внутренний диаметр активной стали ротора

$$D_{в.р} = D_{н.р} - 2h_{а.р} - 2h_{zр},\ см. \quad (5\text{-}6)$$

6. Расчетное определение высоты спинки статора. Если ее замерить нельзя, то определяют по формуле

$$h_а = \frac{1}{2}(D_н - D_в) - h_z,\ см. \quad (5\text{-}7)$$

7. Зубцовое деление статора и ротора

$$t_z = \frac{\pi D_в}{z}\ см; \quad t_{zр} = \frac{\pi D_{н.р}}{z_р},\ см. \quad (5\text{-}8)$$

8. Зубцовое деление статора и ротора на дне паза

$$t'_z = \frac{\pi (D_в + 2h)}{z},\ см; \quad t'_{zр} = \frac{\pi (D_{н.р} - 2h_{zр})}{z},\ см. \quad (5\text{-}9)$$

9. Максимальная ширина зубца статора и ротора (для пазов с параллельными стенками)

$$b''_z = t'_z - b_п; \quad b''_{zр} = t_{zр} - b_{п.р},\ см. \quad (5\text{-}10)$$

10. Минимальная ширина зубца статора и ротора (для пазов с параллельными стенками)

$$b'_z = t_z - b_п; \quad b'_{zр} = t'_{zр} - b_{п.р},\ см. \quad (5\text{-}11)$$

11. Определение расчетной ширины трапецеидального зубца b_{zi} (берется на одной трети его высоты, считая от расточки):

$$b_{zi}=\frac{1}{3}(2b'_z+b''_z),\ см. \tag{5-12}$$

12. Площадь полюсного деления

$$Q_\delta=\tau l_i=\frac{\pi D_в}{2p}l_i,\ см^2. \tag{5-13}$$

13. Площадь поперечного сечения спинки статора

$$Q_а=l_0h_а=(l-n_кb_к)k_ж\left(h_а-\frac{2}{3}d_кm_к\right),\ см^2. \tag{5-14}$$

14. При отсутствии продольных вентиляционных каналов

$$Q_а=(l-n_кb_к)k_жh_а,\ см^2. \tag{5-15}$$

15. Площадь поперечного сечения зубцового слоя статора

$$Q_z=\frac{z}{2p}b_zl_0=3qb_zl_0,\ см^2 \tag{5-16}$$

$z/2p$ — число зубцов, расположенных на полюсном делении.

5-2. РАСЧЕТЫ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Определение числа витков фазы обмотки статора. Из основного закона электромагнитной индукции известно:

$$E=4{,}44fk_\omega w_{эф}\Phi\cdot 10^{-4}\ в, \tag{5-17}$$

где E — наведенная э. д. с. фазы обмотки статора, *в*; f — частота переменного тока, *гц*; k_ω — обмоточный коэффициент, учитывающий укорочение шага и состав катушечной группы; $w_{эф}$ — число эффективных витков в фазе обмотки статора; Φ — магнитный поток одного полюса, *вб*.

Напряжение U, приложенное к обмотке статора, во время работы двигателя уравновешивается в основном противоэлектродвижущей силой E, наведенной в обмотке статора в результате пересечения его витков вращающимся магнитным полем, и лишь очень небольшая часть, порядка 3%, уравновешивается за счет падения напряжения на ее активном и индуктивном сопротивлениях. Отсюда

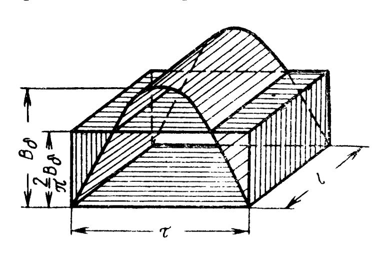


Рис. 5-1. Определение величины магнитного потока по наибольшему значению индукции.

$$E = 0{,}97U,\ в.$$

Решая равенство (5-17) в отношении $w_{эф}$ и заменяя наведенную э. д. с. приложенным напряжением, получаем:

$$w_{эф} = \frac{0{,}97U \cdot 10^4}{4{,}44 f k_\omega \Phi}. \tag{5-18}$$

Магнитный поток Φ выразим через магнитную индукцию B_δ и площадь полюсного деления Q_δ:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} Q_\delta B_\delta,\ вб, \tag{5-19}$$

где $2/\pi$ — коэффициент, учитывающий среднее значение индукции при синусоидальной форме кривой магнитного потока (рис. 5-1);

$$Q_\delta = \tau l_i = \frac{\pi D_в l_i}{2p},\ см^2, \tag{5-20}$$

где l_i — расчетная длина активной стали, *см*; $D_в$ — диаметр расточки статора, *см*.

Подставляя Q_δ из (5-20) в (5-19), получаем значение Φ, выраженное через линейные размеры двигателя:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} \frac{\pi D_в}{2p} l_i B_\delta = \frac{D_в}{p} l_i B_\delta,\ вб. \tag{5-21}$$

Подставляя Φ из (5-21) в (5-18), а также $f = 50$ *гц* и $k_\omega = 0{,}95$, получаем формулу для определения числа витков в фазе в зависимости от B_δ, линейных размеров двигателя и числа полюсов:

$$w_{эф} = \frac{0{,}45Up \cdot 10^2}{D_в l_i B_\delta}. \tag{5-22}$$

Определение числа эффективных проводов в пазу $w_{п.эф}$. Каждый виток располагается в двух пазах на расстоянии шага y. Если число пар пазов обозначим через $z/2$, а общее число витков в трех фазах статора равно $3w_{эф}$, то получим:

$$3w_{эф} = w_{п.эф}\frac{z}{2}, \text{ откуда } w_{эф} = w_{п.эф}\frac{z}{6}. \quad (5\text{-}23)$$

Подставляя значение $w_{эф}$ из (5-23) в формулу (5-22) и произведя преобразования, получаем:

$$\frac{z}{6}w_{п.эф} = \frac{0,45Up\cdot 10^2}{D_в l_i B_\delta}; \quad w_{п.эф} = \frac{2,7\cdot Up\cdot 10^2}{D_в l_i B_\delta z}. \quad (5\text{-}24)$$

Определение числа эффективных проводов в пазу по формуле (5-24) не представляет особых трудностей. Однако значительно проще и с той же степенью точности определяется $w_{п.эф}$ в зависимости от размеров двигателя и B_δ по кривой на рис. 5-2 и табл. 5-2 и 5-3. Кривые на рис. 5-2 представляют собой зависимость числа эффективных проводов в пазу от площади продольного разреза ($l_i D_в$, *см*²) условного электродвигателя. За условный принят двигатель, у которого $B_\delta =$ $=0,6$ *тл*, $z=36$, напряжение — 220/380 *в*. На рис. 5-2 даны различные кривые для определения $w_{п.ус}$ в зависимости от числа пар полюсов.

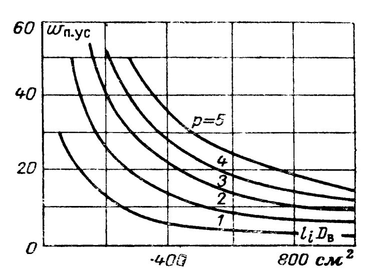


Рис. 5-2. График числа проводов в пазу условного двигателя.

В случае, если при расчете двигателя B_δ и z отличаются от условных, количество проводов в пазу, взятое по кривой, умножается на поправочный коэффициент C_1 из табл. 5-2.

Большинство двигателей до 100 *квт* рассчитано на номинальное напряжение 220/380 *в*. Однако в практике ремонта может встретиться двигатель с напряжением, отличным от этого: в таком случае пользуются поправочным коэффициентом C_2 (табл. 5-3).

Таким образом,

$$w_{п.эф} = w_{п.ус}C_1C_2, \quad (5\text{-}25)$$

где $w_{п.ус}$ — число эффективных проводов в пазу статора условного двигателя, определяемое по кривой на рис. 5-2.

Таблица 5-2

B_δ, *гл*	Коэффициент C_1 при z_1										
	24	27	30	36	42	45	48	54	60	64	72
0,54	1,668	1,480	1,323	1,112	1,059	0,890	0,834	0,742	0,667	0,626	0,556
0,56	1,600	1,420	1,284	1,07	1,025	0,856	0,802	0,714	0,642	0,602	0,535
0,58	1,550	1,370	1,240	1,034	0,990	0,827	0,775	0,690	0,620	0,582	0,517
0,6	1,500	1,330	1,20	1,000	0,958	0,800	0,750	0,667	0,600	0,563	0,500
0,62	1,452	1,289	1,161	0,968	0,927	0,774	0,726	0,645	0,580	0,545	0,484
0,64	1,407	1,240	1,120	0,938	0,898	0,750	0,703	0,625	0,562	0,528	0,469
0,66	1,360	1,210	1,092	0,910	0,872	0,728	0,682	0,607	0,546	0,512	0,455
0,68	1,323	1,175	1,058	0,882	0,845	0,706	0,661	0,588	0,529	0,496	0,441
0,70	1,285	1,140	1,028	0,857	0,821	0,686	0,642	0,571	0,514	0,482	0,428
0,72	1,251	1,110	1,000	0,834	0,799	0,667	0,625	0,556	0,500	0,469	0,417
0,74	1,216	1,080	0,973	0,801	0,777	0,648	0,608	0,540	0,486	0,456	0,405
0,76	1,185	1,052	0,948	0,780	0,757	0,632	0,592	0,527	0,474	0,445	0,395
0,78	1,153	1,024	0,923	0,769	0,736	0,615	0,577	0,513	0,461	0,433	0,384
0,80	1,125	0,999	0,900	0,750	0,718	0,600	0,562	0,500	0,450	0,405	0,375

Оптимальное значение максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ. Из равенства (5-24) видно, что $w_{п.эф}$ зависит от максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ. Остальные величины в этом равенстве постоянные.

Таблица 5-3

Номинальное напряжение, *в*	Коэффициент C_2
120/220	0,578
220/380	1,00
500Y	1,32

Основным критерием правильного расчета обмотки следует считать величину тока холостого хода $I_{х.х}$, который может быть замерен при включении двигателя в сеть после перемотки.

На основе опытных данных многих серий машин построены кривые предельных значений тока холостого хода $I_{х.х}/I_{ном}$ в зависимости от мощности и скорости вращения (рис. 5-3). Ток холостого хода, полученный в результате расчета, должен быть близок к величине, взятой по кривым предельных значений.

Каждому электродвигателю в зависимости от его геометрии и применяемых марок активных материалов соответствует определенное значение B_δ. Если задать B_δ больше этой величины, то $I_{х.х}$ будет больше величины, взятой

по кривым предельных значений, а электродвигатель будет греться на холостом ходу. Если же задаться B_δ меньше этой величины, то электродвигатель потеряет мощность и $I_{х.х}$ будет меньше, чем по кривым предельных значений.

Необходимо заметить, что уменьщение B_δ против фирменного оказывает отрицательное действие еще и потому, что уменьшается максимальный момент вращения $M_{макс}$ (перегрузочная способность).

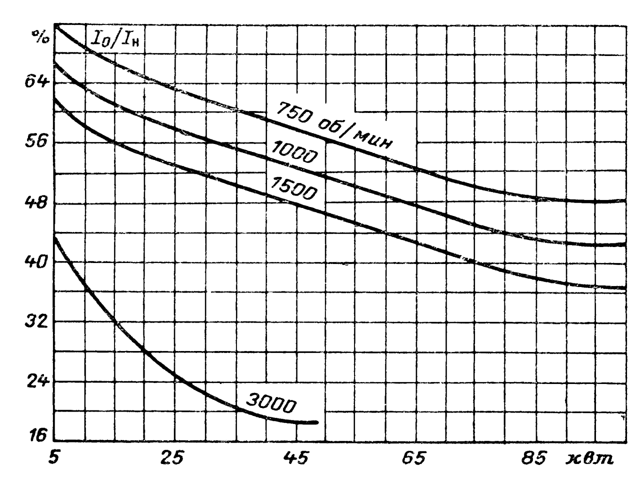


Рис. 5-3. График предельных значений тока холостого хода трехфазных асинхронных двигателей.

На рис. 5-4 дана кривая изменения пускового момента в зависимости от величины скольжения $M=f(s)$. На этой кривой имеются три характерные точки.

Точка *1:* $M_п$ — начальный пусковой момент. Эта точка определяет момент включения в сеть; $n=0$, $s=1$. Электродвигатель развивает начальный пусковой момент. Далее до точки 2 $M_п$ растет, s уменьшается.

Точка *2:* $M_{макс}$ — область скольжения, где момент достигает максимального значения ($s=0{,}12$—$0{,}20$).

Точка *3:* Пройдя область наибольшего момента $M_{макс}$, величина M уменьшается, и при $s=0$ момент также равен нулю. Область между $M_{макс}$ и $M=0$ есть область устойчивой работы электродвигателя (на графике заштриховано, а точка *3* — номинальный режим). Здесь

при возмущении, вызвавшем положительное приращение скорости вращения, возникает отрицательный избыточный момент, стремящийся замедлить вращение. При возмущении, вызвавшем замедление вращения электродвигателя, момент увеличивается и даст положительное ускорение, электродвигатель увеличивает скорость вращения. В левой части кривой устойчивая работа электродвигателя невозможна, так как здесь при отклонении скорости в любую сторону возникает избыточный момент, действующий в ту же сторону.

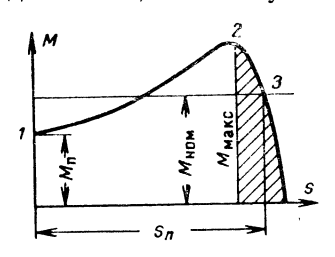


Рис. 5-4. График изменения пускового момента в зависимости от скольжения S.

Для нормальной работы электродвигателя необходимо, чтобы $M_{макс}$ был существенно больше номинального момента $M_{ном}$, так как в противном случае небольшие точки или посадка напряжения могут «опрокинуть» электродвигатель, т. е. остановить его.

По ГОСТ 183-66 для трехфазных электродвигателей

$$K_у = \frac{M_{макс}}{M_{ном}} = 1,8 - 2,1,$$

где $K_у$ — коэффициент, определяющий кратность перегрузочного момента.

Из теории асинхронного двигателя известно, что $M_{макс} \equiv \Phi^2$.

Пусть до перемотки трехфазного электродвигателя $K_у = 1,8$. После перемотки магнитный поток уменьшился на 10%, т. е. $\Phi' = 0,9\Phi$, тогда $M'_{макс} = \Phi'^2$ в свою очередь будет равен $0,9^2 M_{макс} = 0,81 M_{макс}$, т. е. понизится на 19%, а перегрузочная способность

$$K'_у = 1,8 \cdot 0,81 = 1,46.$$

Полученный результат является нежелательным, так как при этом электродвигатель может не соответствовать условиям привода.

Таким образом, существуют довольно узкие пределы величины B_δ, которая даст приемлемую нагрузку активных материалов, перегрузочную способность $K_у$ и ток

холостого хода $I_{х.х}$, равный или близкий к величине, взятой по кривым предельных значений. Эту величину будем называть оптимальным значением максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ.

Все остальные параметры электродвигателя (P_2, $I_{х.х}$ и др.), полученные при оптимальном значении B_δ, будем в дальнейшем также называть оптимальными.

В тех случаях, когда оптимальное значение B_δ известно или может быть определено из каталога, определение числа эффективных витков в пазу $w_{п.эф}$ решается однозначно по равенству (5-25). Если же оптимальная величина B_δ неизвестна и определить ее по каталогу и другим путем невозможно, определение $w_{п.эф}$ усложняется. Дело в том, что в литературе значением B_δ задаются в широких пределах (0,5—0,9 *тс*), а ток холостого хода $I_{х.х}$ должен иметь вполне определенную величину.

Так, например, электродвигатель мощностью 15 *квт*, 3 000 *об/мин* имеет по кривым предельных значений $\frac{I_{х.х}}{I_{ном}} \cdot 100 = 32\%$. Такое значение может получиться при вполне определенном (оптимальном) значении B_δ в зависимости от геометрии машины, величины воздушного зазора и т. д. Для одного электродвигателя этого можно достигнуть, задаваясь значением $B_\delta = 0{,}5$ *тл*, для другого — 0,7 *тл* и т. д. Таким образом, приемлемость выбранной B_δ в конечном счете определяется током холостого хода, имеющим вполне определенную величину в зависимости от мощности и скорости вращения. Поэтому при расчетах для определения B_δ приходится задаваться различными ее значениями, пока не получим $I_{х.х}$, близкий к величине, взятой по кривым предельных значений.

Для определения степени изменения тока холостого хода в зависимости от изменения величины B_δ от оптимального значения воспользуемся следующими зависимостями:

$$I_\mu \approx I_{х.х} = K R_m U B_\delta^2, \ a; \tag{5-26}$$

$$\Phi = K U B_\delta, \ вб. \tag{5-27}$$

Из равенств (5-26) и (5-27) видно, что намагничивающий ток пропорционален квадрату B_δ, а магнитный поток

Ф пропорционален первой степени B_δ. Следовательно, если приложенное напряжение U и сопротивление магнитной цепи R_m считать постоянными величинами, то при отклонениях B_δ от оптимального значения Ф меняется в первой степени, а ток холостого хода $I_{x.x}$ — во второй.

Такая зависимость существует в довольно узких пределах вблизи оптимального значения B_δ или при отклонении от него на 2—3%.

При более значительном отклонении B_δ (а значит, и числа витков от оптимального) квадратичная зависимость тока холостого хода $I_{x.x}$ от числа витков не соблюдается.

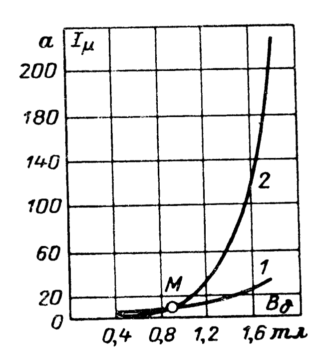


Рис. 5-5. График изменения тока холостого хода в зависимости от отклонения B_δ от оптимального значения.

$1 - R_m =$ пост; $2 - R_m = f(F_\delta)$.

Дело в том, что электротехническая сталь, применяемая для статоров и роторов, при намагничивании способна изменять магнитную проницаемость, при этом насыщенная сталь резко уменьшает магнитную проницаемость, что вызывает увеличение магнитного сопротивления магнитопровода R_m в целом. Следовательно, на намагничивающий ток I_μ влияют два фактора: изменение магнитного потока и изменение магнитного сопротивления магнитной цепи.

Из равенства (5-26) видно, что характер изменения намагничивающего тока I_μ в зависимости от изменения B_δ будет в конце концов зависеть от изменения магнитного сопротивления магнитопровода R_m.

На рис. 5-5 приведены кривые изменения тока холостого хода $I_{x.x}$ в зависимости от магнитной индукции в зазоре. Кривые построены на основании данных табл. 5-4 для электродвигателя типа А-62-6, мощностью 10 *квт*, напряжением 220/380 *в*, 1 000 *об/мин* [Л. 1]. Кривая *1* построена исходя из предположения, что сопротивление магнитной цепи R_m не изменяется, а кривая *2* с учетом изменения сопротивления магнитной цепи в зависимости от магнитной индукции в воздушном зазоре.

Из табл. 5-4 видно, что при увеличении B_δ в 1,5 раза $I_{x.x}$ увеличивается не в 2,25 раза, как это должно было

Таблица 5-4

Параметры	Номера замеров						
	1	2	3	4	5	6	7
Число эффективных витков в фазе обмотки статора	972	648	484	324	216	187	162
Величина максимальной магнитной индукции B_δ, *тл*	0,238	0,44	0,586	0,88	1,32	1,52	1,76
Во сколько раз максимальная магнитная индукция B_δ изменилась против расчетной (оптимальной) с учетом насыщения активной стали	Уменьшена в 3 раза	Уменьшена в 2 раза	Уменьшена в 1,5 раза	Расчетная	Увеличена в 1,5 раза	Увеличена в 1,73 раз	Увеличена в 2 раза
Ток холостого хода $I_{x.x}$, *а*	0,6	1,2	2,7	8,0	50,0	100,0	230,0
Во сколько раз изменится ток холостого хода против нормальной величины	Уменьшен в 13,34 раза	Уменьшен в 6,66 раза	Уменьшен в 2,97 раза	Нормальный	Увеличен в 6,25 раза	Увеличен в 12,5 раза	Увеличен в 28,8 раза
Ток холостого хода при квадратичной зависимости, *а*	0,89	2	3,6	8	17,8	24	32
Во сколько раз изменится ток холостого хода при квадратичной зависимости	Уменьшен в 9 раз	Уменьшен в 4 раза	Уменьшен в 2,96 раза	Нормальный	Увеличен в 2,24 раза	Увеличен в 3 раза	Увеличен в 4 раза

быть при квадратичной зависимости, а в 6,25 раза. При увеличении B_δ в 2 раза $I_{х.х}$ увеличивается в 28,8 раза, превысив номинальный ток в 10,7 раза.

Кривые *1* и *2* на рис. 5-5 пересекаются в точке M, определяющей оптимальное значение максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ.

Анализируя кривую *2*, можно сделать вывод, что небольшое отклонение B_δ от оптимального значения резко увеличивает $I_{х.х}$. Следовательно, правильно рассчитанным двигателем можно считать такой, у которого максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре B_δ равна или близка к оптимальному значению. Допускается отклонение B_δ от оптимального не более 5%. Оптимальное значение B_δ может быть определено из равенства (5-24), если известно эффективное число проводов:

$$B_\delta = \frac{2{,}7pU \cdot 10^2}{D_в l_i w_{п.эф} z}, \ тл. \tag{5-28}$$

Определение числа витков и тока фазного ротора. Расчет обмотки фазного ротора при ремонте производят в случае отсутствия старой обмотки или при необходимости изменения скорости вращения электродвигателя. При пересчете обмотки статора на другое напряжение обмотку ротора не следует пересчитывать, так как напряжение на кольцах и ток в роторе не изменяются.

Электродвижущая сила фазного ротора при режиме короткого замыкания

$$E_р = E \frac{k_{\omega р} w_{р.эф}}{k_\omega w_{эф}}, \ в, \tag{5-29}$$

где E и $E_р$ — фазные э. д. с. статора и ротора, *в*; k_ω и $k_{\omega р}$ — обмоточные коэффициенты обмоток статора и ротора; $w_{эф}$ и $w_{р.эф}$ — число эффективных витков в фазе статора и ротора.

Если пренебречь падением напряжения в обмотках статора и ротора, незначительных по величине, а значение обмоточных коэффициентов приравнять, что также вполне допустимо в практике поверочных расчетов

при ремонте, то для определения фазного напряжения при одинаковых соединениях их обмоток имеем:

$$U_р = U \frac{w_{р.эф}}{w_{эф}}, \ в; \quad (5\text{-}30)$$

$$w_{р.эф} = w_{эф} \frac{U_р}{U}, \quad (5\text{-}31)$$

где $U_р$ и U — фазное напряжение ротора и статора, *в*.

В случае соединения обмотки статора в треугольник, а ротора в звезду получим:

$$U_р = \sqrt{3}\, U \frac{w_{р.эф}}{w_{эф}}, \ в. \quad (5\text{-}32)$$

При выборе напряжения на кольцах ротора можно пользоваться табл. 5-5.

Таблица 5-5

Вид обмотки	Линейное напряжение на кольцах ротора, *в*	
	P_2=3—20 *квт*	P_2=20—100 *квт*
Волновая	100—290	150—290
Катушечная	100—290	220—340

Пользуясь соотношением $w_{эф}/w_{эф.р}$ как коэффициентом трансформации асинхронного двигателя, определяем ток ротора по формуле

$$I_р = (0{,}9 \div 0{,}85)\, I \frac{w_{эф}}{w_{эф.р}}, \ a, \quad (5\text{-}33)$$

где коэффициент 0,9—0,85 вводится в связи с тем, что н. с. ротора на 10—15% меньше, чем статора, из-за рассеяния основного магнитного потока.

Определение магнитных нагрузок магнитной цепи электродвигателя. Для того чтобы электродвигатель был правильно рассчитан и мог отдавать оптимальную мощность при данных размерах и допустимом нагреве активной стали и обмотки, необходимо, чтобы магнитные нагрузки были в пределах допустимых норм во всех частях цепи машины (табл. 5-6).

Необходимо также правильно выбрать допустимую плотность тока и линейную нагрузку (рис. 5-8).

Между тем максимальная магнитная нагрузка в воздушном зазоре B_δ и плотность тока в обмотке статора колеблются в широких пределах. Встречаются электродвигатели с максимальной магнитной индукцией в воздушном зазоре $B_\delta = 0{,}35$ *тл* и $0{,}8 - 0{,}9$ *тл*, а также с плотностью тока в обмотке статора $2 - 9$ *а/мм*.

Поэтому правильный выбор величины B_δ и плотности тока в обмотке двигателя представляет основную трудность при расчетах и пересчетах обмоток. Для правильного выбора магнитных нагрузок разберем магнитную цепь машины с точки зрения магнитного сопротивления. Она состоит из пяти частей (рис. 5-6): спинки статора *1*, зубцового слоя статора *2*, воздушного зазора между статором и ротором *3*, зубцового слоя ротора *4* и спинки ротора *5*.

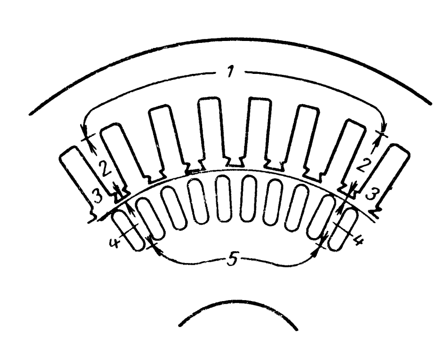


Рис. 5-6. Пять частей магнитной цепи асинхронной машины.

Магнитный поток, выйдя из спинки статора *1*, проходит через зубцовый слой *2*, далее через воздушный зазор между статором и ротором *3*, проходит зубцовый слой ротора *4* в спинку ротора *5* и возвращается в спинку статора *1*.

Для определения магнитной индукции в различных частях машины удобно выразить ее через максимальную магнитную индукцию в воздушном зазоре B_δ, определение которой было объяснено выше. Ниже приводится определение магнитной индукции в частях магнитной цепи машины — в зубцах и спинках статора и ротора.

Индукция в зубцах статора B_z и ротора $B_{z\text{р}}$. К воздушному зазору примыкают зубцовые слои статора с площадью Q_z и ротора $Q_{z\text{р}}$.

Для определения индукции в зубцах статора и ротора следует магнитный поток Ф, пронизывающий зазор, разделить на площадь зубцового слоя:

$$B_z = \frac{\pi}{2} \frac{\Phi}{Q_z},\ \text{тл}; \qquad (5\text{-}34)$$

$$B_{zp} = \frac{\pi}{2} \frac{\Phi}{Q_z}, \; \textit{тл}, \tag{5-35}$$

где $\pi/2$ — поправочный коэффициент, вводится вследствие синусоидальности магнитной индукции в воздушном зазоре и неравномерности ее распределения между отдельными зубцами.

На рис. 5-7 показано, что в данный момент наибольшая индукция будет в зубцах, расположенных против точки с максимальной индукцией в зазоре.

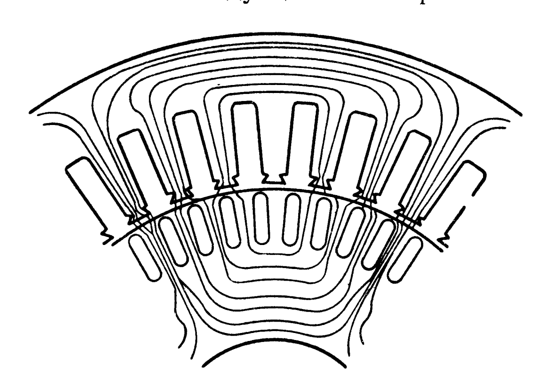


Рис. 5-7. Распределение магнитного потока в асинхронной машине.

Подставляя в равенство (5-34) значение Φ из (5-21) и Q_z из (5-16), получаем для B_z статора следующее выражение:

$$B_z = \frac{t_z l_i}{b_z l_0} B_\delta, \; \textit{тл}. \tag{5-36}$$

Поступая таким же образом для B_{zp}, получаем следующее выражение:

$$B_{zp} = \frac{t_{zp} l_{ip}}{b_{zp} l_{0p}} B_\delta, \; \textit{тл}. \tag{5-37}$$

Из равенств (5-36) и (5-37) видно, что индукция в зубцовом слое зависит от максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ, ширины зубца, величины зубцового деления и не зависит от числа полюсов. В случае изменения числа полюсов индукция в зубцовом слое не изменяется при условии, что B_δ остается без изменения.

Величина наибольшей индукции в зубцах статора колеблется в пределах 1,4—1,6 *тл*. В тихоходных двигателях она может достигать значения 1,7—1,8 *тл*. Величина индукции в зубцах ротора всегда на 10% ниже, так как площадь зубцового слоя ротора, как правило, больше площади зубцового слоя статора.

Индукция в спинке статора $B_а$ *и ротора* $B_{ар}$. Пройдя зубцовый слой, магнитный поток Ф распределяется в двух направлениях (рис. 5-7), в каждом из которых проходит половина Ф.

В отличие от зубцового слоя статора и ротора, где магнитная индукция распределена неравномерно и введен поправочный коэффициент $\pi/2$, для спинки этого не требуется, так как в ней магнитная индукция распределяется равномерно по всему сечению.

Таким образом, между потоком Ф и наибольшим значением индукции в спинке статора существует следующее равенство:

$$B_а = \frac{Ф}{2Q_а}, \ тл. \quad (5\text{-}38)$$

Подставляя Ф из равенства (5-21) и $Q_а$ из (5-15), получаем для статора и ротора:

$$B_а = \frac{D_в l_i}{2pl_0 h_а} B_\delta, \ тл; \quad (5\text{-}39)$$

и

$$B_{а.р} = \frac{D_р l_р}{2pl_0 h_{а.р}} B_\delta, \ тл. \quad (5\text{-}40)$$

Из равенств (5-39) и (5-40) видно, что магнитная индукция в спинке статора $B_а$ и ротора $B_{а.р}$ при данной геометрии магнитопровода зависит только от числа полюсов $2p$ при условии, если B_δ остается без изменения. При изменении числа полюсов индукция в спинке статора и ротора будет изменяться обратно пропорционально изменению числа полюсов.

Величина $B_{а.р} < B_а$, так как заводы-изготовители, как правило, задаются такой геометрией двигателя, что площадь спинки ротора на 10—15% больше площади спинки статора.

При расчетах электродвигателей $B_{а.р}$ можно не проверять и принять равной 1,2—1,4 *тл*. Для тихоходных двигателей она может быть значительно ниже, а для

быстроходных, особенно двухполюсных, ее величина иногда достигает значения 1,6—1,7 *тл*.

Значение магнитной индукции в различных частях магнитной цепи для асинхронных электродвигателей дано в табл. 5-6.

Таблица 5-6

Участки магнитной цепи	Число полюсов	Значение индукции B, *тл*
Воздушный зазор	$2p=2$	$B_\delta = 0,6—0,67$
	$2p>2$	$B_\delta = 0,65—0,85$
Спинки статора		$B_a = 1,2—1,7$
Спинка ротора	—	$B_{a.р} = 1,0—1,6$
Зубцы статора		$B_z = 1,3—1,7$
Зубцы ротора в наиболее узком сечении (при пазах с параллельными стенками)	—	$B_{zр} = 1,0—1,6$

Определение электрических нагрузок обмотки. Если нагрев активной стали при прочих равных условиях зависит от магнитных нагрузок B_a, B_δ и B_z, то нагрев меди (обмотки) зависит от электрических нагрузок, а именно от плотности тока Δ и линейной нагрузки AS.

Плотность тока — ток в амперах, приходящийся на 1 *мм*²:

$$\Delta = \frac{I_{ном}}{q_{эф}}, \ а/мм^2. \qquad (5\text{-}41)$$

Величина допустимой плотности тока не является постоянной, а зависит от исполнения машины (открытое, закрытое), степени вентиляции, скорости вращения, номинального напряжения и линейной нагрузки.

У открытых машин, имеющих интенсивную вентиляцию, плотность тока выше, чем у закрытых. Чем больше номинальное напряжение, тем толще должна быть пазовая и витковая изоляция и, следовательно, тем ниже допускаемая плотность тока, так как изоляция затрудняет отвод тепла. Кроме того, чем выше скорость вращения, тем при прочих равных условиях вентиляция лучше, и, следовательно, у быстроходных машин плотность тока может быть допущена выше, чем у тихоходных.

Допустимая плотность тока электродвигателей в зависимости от мощности и исполнения дана на рис. 5-8.

Линейная нагрузка AS. Чтобы судить о нагреве машины, недостаточно знать плотность тока Δ, так как тепло выделяется всеми проводниками, расположенными в пазах. Сравним условия охлаждения двух электродвигателей, имеющих равные расточку и размеры, равную плотность тока, количество проводов в пазу $w_{п.эф}$, сечение витка $q_{эф}$, но разное число пазов при прочих равных условиях (исполнение двигателя, вентиляция и т. д.).

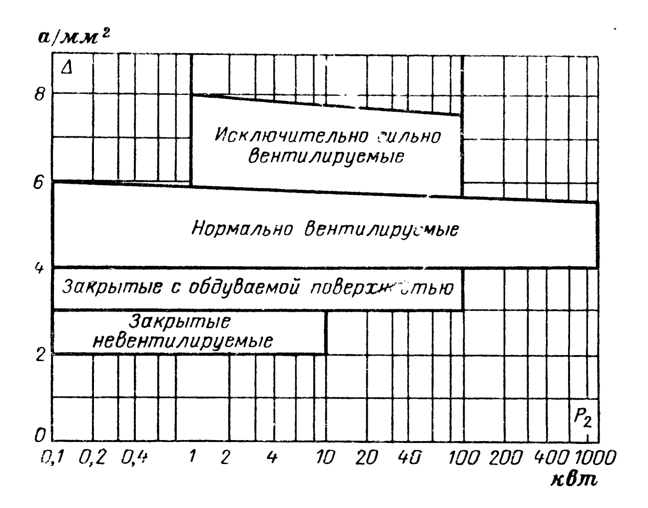


Рис. 5-8. Графики допустимых плотностей тока S_a в зависимости от исполнения и полезной мощности P_2.

Электродвигатель, имеющий меньшее число пазов, будет находиться с точки зрения нагрева в более благоприятных условиях, чем двигатель с большим числом пазов.

Это объясняется тем, что поверхность охлаждения у них одинакова, а количество выделяемого тепла у электродвигателя с большим числом пазов больше. Для сохранения равных условий (с точки зрения нагрева) нужно снизить плотность тока у двигателя с большим числом пазов.

С другой стороны, если сравнить два двигателя, имеющих одинаковое число пазов, но площадь паза одного из них больше, то двигатель, имеющий больший паз, при прочих равных условиях (одинаковое сечение витков, исполнение, вентиляция и т. д.) будет находить-

ся в более тяжелых условиях. Это происходит потому, что в паз данного электродвигателя укладывается большее количество проводников одинакового сечения.

Для того чтобы эти машины находились в равных тепловых условиях, плотность тока у электродвигателя с большим пазом должна быть задана меньше по сравнению с электродвигателем, имеющим меньший паз.

Для правильного выбора плотности тока в начале необходимо выяснить, сколько тепла выделяется с поверхности машины при данных размерах и заданной плотности тока.

Количество выделенного тепла с поверхности электродвигателя можно определить тепловым расчетом, однако он слишком громоздкий и проводится в исключительных случаях при конструировании новых машин или при модернизации крупных уникальных машин с повышением их мощности.

При ремонте электрических машин производится сокращенный расчет. В этом случае для выбора плотности тока достаточно воспользоваться линейной нагрузкой AS, позволяющей контролировать правильность выбора плотности тока. Линейная нагрузка представляет собой произведение силы тока в проводнике на число проводников на 1 *см* длины расточки статора и выражается следующим равенством:

$$AS = \frac{zI_{\text{ном}} w_{\text{п.эф}}}{\pi D_{\text{в}}} = \frac{w_{\text{п.эф}} I_{\text{ном}}}{t_z}, \ a/см.$$

Если вместо $\pi D_{\text{в}}$ подставить величину $\tau \cdot 2p$, а вместо $z/2p$ величину $3q$, то получим:

$$AS = \frac{3q w_{\text{п.эф}} I_{\text{ном}}}{\tau}, \ a/см. \qquad (5\text{-}42)$$

Эта величина нормируется и так же, как и плотность тока, допускается больше в машинах с лучшей вентиляцией и с большей скоростью вращения.

Зависимость линейной нагрузки AS от мощности P_2 и степени вентиляции дана на рис. 5-9.

Фактор пропорциональности перегрева обмотки статора. Произведение плотности тока Δ на линейную нагрузку AS принято называть фактором пропорциональности перегрева обмотки статора. Эта величина не зависит от размеров машины и является величиной, близкой

к постоянной. В тех случаях, когда линейная нагрузка AS исходя из геометрических размеров машины является большой, следует снижать величину плотности тока настолько, чтобы фактор пропорциональности $AS\Delta$ находился в пределах допустимых норм.

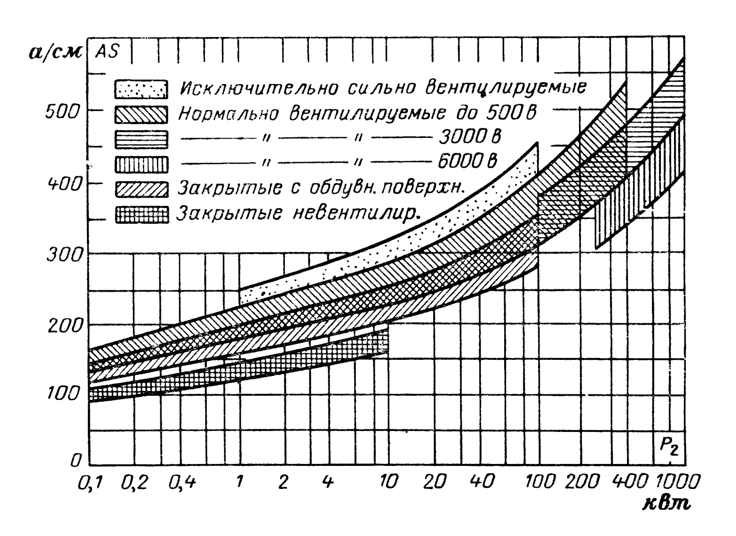


Рис. 5-9. График допустимых линейных нагрузок.

Определение тока холостого хода расчетным путем. Правильно рассчитанный двигатель должен иметь ток холостого хода $I_{х.х}$, близкий по величине к взятому по кривым предельных значений (рис. 6-3).

В случае отсутствия у электродвигателя паспортной таблички или при модернизации машины с увеличением мощности и с изменением скорости вращения важно определить ток холостого хода.

По его величине судят о правильности выбора магнитных нагрузок. Ток холостого хода определяется по следующим формулам:

$$I_{х.хY} = \frac{0,82pF_{х.х}}{w_{п.эф}\frac{z}{6}},\ a; \tag{5-43}$$

$$I_{х.х\Delta} = \frac{1,42pF_{х.х}}{w_{п.эф}\frac{z}{6}},\ a, \tag{5-44}$$

где $I_{х.хY}$, $I_{х.х\triangle}$ — ток холостого хода при соединении обмотки статора звездой и треугольником, *а*; $F_{х.х}$ — намагничивающая сила холостого хода на полюс;

$$F_{х.х} = F_{\delta} + F_{ст} + F_{р},\ а, \tag{5-45}$$

где F_{δ} — намагничивающая сила воздушного зазора; $F_{ст}$, $F_{р}$ — намагничивающая сила статора и ротора:

$$F_{ст} = F_{а} + F_{z},\ а, \tag{5-46}$$

где $F_{а}$, F_{z} — намагничивающая сила спинки и зубцового слоя.

С достаточной степенью точности можно считать, что намагничивающая сила магнитной цепи ротора на 10% меньше намагничивающей силы статора, поэтому

$$F_{х.х} = F_{\delta} + 1{,}9\,(F_{а} + F_{z}),\ а. \tag{5-47}$$

Определение намагничивающей силы воздушного зазора на полюс:

$$F_{\delta} = 0{,}8\delta k_{с} B_{\delta} \cdot 10^{4},\ а, \tag{5-48}$$

где $k_{с}$ — коэффициент воздушного зазора;

$$k_{с} = \frac{(t_{z} + 10\delta)}{(b_{z} + 10\delta)} \frac{(t_{zр}' + 10\delta)}{(b_{zр} + 10\delta)}. \tag{5-49}$$

Определение намагничивающей силы спинки статора $F_{а}$:

$$F_{а} = H_{а} L_{а},\ а, \tag{5-50}$$

где $H_{а}$ — удельная намагничивающая сила. Берется по табл. 5-7 в зависимости от индукции $B_{а}$; $L_{а}$ — средняя длина пути магнитных силовых линий в спинке статора на полюс:

$$L_{а} = \frac{\pi (D_{н} - h_{а})}{4p},\ см. \tag{5-51}$$

Определение намагничивающей силы зубцового слоя статора:

$$F_{z} = H_{z} h_{z},\ а, \tag{5-52}$$

где H_{z} — удельная намагничивающая сила зубцового слоя, определяется по табл. 5-8.

Таблица 5-7

Кривая намагничивания для спинки статора. Сталь Э11

B_a, тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,1	0,37	0,39	0,413	0,438	0,46	0,48	0,5	0,52	0,54	0,55
0,2	0,57	0,59	0,6	0,62	0,63	0,65	0,67	0,68	0,7	0,71
0,3	0,72	0,74	0,76	0,78	0,79	0,8	0,82	0,84	0,86	0,88
0,4	0,89	0,91	0,93	0,94	0,96	0,98	1,0	1,02	1,04	1,06
0,5	1,08	1,1	1,13	1,15	1,18	1,2	1,22	1,24	1,26	1,28
0,6	1,31	1,34	1,36	1,39	1,41	1,44	1,47	1,50	1,53	1,56
0,7	1,59	1,62	1,66	1,69	1,72	1,76	1,8	1,83	1,86	1,9
0,8	1,94	1,98	2,01	2,04	2,08	2,12	2,16	2,2	2,23	2,27
0,9	2,31	2,35	2,39	2,43	2,48	2,52	2,55	2,6	2,65	2,69
1,0	2,74	2,79	2,84	2,89	2,95	3,0	3,05	3,11	3,18	3,23
1,1	3,32	3,38	3,44	3,51	3,57	3,67	3,74	3,82	3,9	3,98
1,2	4,1	4,18	4,26	4,35	4,44	4,55	4,66	4,75	4,87	4,98
1,3	5,09	5,21	5,33	5,46	5,58	5,72	5,85	6,0	6,18	6,35
1,4	6,56	6,75	6,95	7,17	7,4	7,63	7,89	8,15	8,43	8,7
1,5	9,05	9,34	9,65	10,0	10,4	10,9	11,3	11,9	12,4	12,9
1,6	13,7	14,4	15,2	15,9	16,6	17,2	18,2	19,1	20,1	21,1
1,7	21,8	23,1	24,1	25,5	26,1	27,2	—	—	—	—

Определение сечения витка $q_{эф}$ при всыпной обмотке из круглого провода. Определение сечения витка в обмотке, состоящей из жестких катушек, укладываемых в прямоугольные пазы с параллельными стенками, когда

Таблица 5-8

Основная кривая намагничивания. Сталь Э11

B, тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,4	1,4	1,43	1,46	1,49	1,52	1,55	1,58	1,61	1,64	1,67
0,5	1,71	1,75	1,79	1,83	1,87	1,91	1,95	1,99	2,03	2,07
0,6	2,11	2,16	2,21	2,26	2,31	2,36	2,41	2,46	2,51	2,56
0,7	2,61	2,66	2,71	2,76	2,81	2,87	2,93	2,99	3,06	3,12
0,8	3,18	3,24	3,30	3,37	3,44	3,52	3,60	3,69	3,78	3,87
0,9	3,97	4,07	4,17	4,27	4,37	4,47	4,58	4,69	4,80	4,91
1,0	5,02	5,14	5,27	5,41	5,55	5,70	5,85	6,00	6,15	6,31
1,1	6,47	6,64	6,82	7,01	7,20	7,39	7,59	7,79	8,00	8,21
1,2	8,43	8,65	8,91	9,18	9,46	9,76	10,1	10,4	10,7	11,0
1,3	11,4	11,8	12,2	12,6	13,0	13,4	13,8	14,3	14,8	15,3
1,4	15,8	16,4	17,1	17,8	18,6	19,5	20,5	21,5	22,6	23,8
1,5	25,0	26,4	27,9	29,5	30,1	32,8	34,6	36,6	38,8	41,2
1,6	43,7	46,3	49,1	52,2	55,3	58,8	62,3	66	69,8	73,7
1,7	77,8	82,0	86,3	90,7	96,3	101	106	111	116	122
1,8	128	134	142	146	152	159	166	173	180	188
1,9	197	206	216	226	236	246	256	268	282	296
2,0	310	325	343	365	390	420	455	495	545	595
2,1	655	725	800	880	950	1 040	1 120	1 200	1 280	1 360
2,2	1 440	1 520	1 600	1 680	1 760	1 840	1 920	2 000	2 080	2 160
2,3	2 240	2 320	2 400	2 480	2 560	2 640	2 720	2 800	2 880	2 960
2,4	3 040	3 120	3 200	3 280	3 360	3 440	3 520	3 600	3 680	3 760
2,5	3 840	3 920	4 000	4 080	4 160	4 240	4 320	4 400	4 480	4 560

применяется обмоточный провод прямоугольного сечения, не представляет особых трудностей, так как заполнение паза медными проводами и изоляцией происходит в этом случае в строго определенном порядке. Значительно большие затруднения вызывает определение сечения круглого провода при всыпной обмотке, в связи с чем на этом мы останавливаемся особо.

Сечение эффективного витка

$$q_{\text{эф}} = K_{\text{п}} \frac{Q_{\text{п.св}}}{w_{\text{п.эф}}}, \quad мм^2, \tag{5-53}$$

где $K_{\text{п}}$ — коэффициент заполнения паза; $Q_{\text{п.св}}$ — площадь паза в свету, $мм^2$; $w_{\text{п.эф}}$ — число эффективных проводов в пазу.

Площадь паза в свету $Q_{\text{п.св}}$ зависит от формы паза. На рис. 5-10 даны наиболее употребительные формы паза и формулы для расчета их площади.

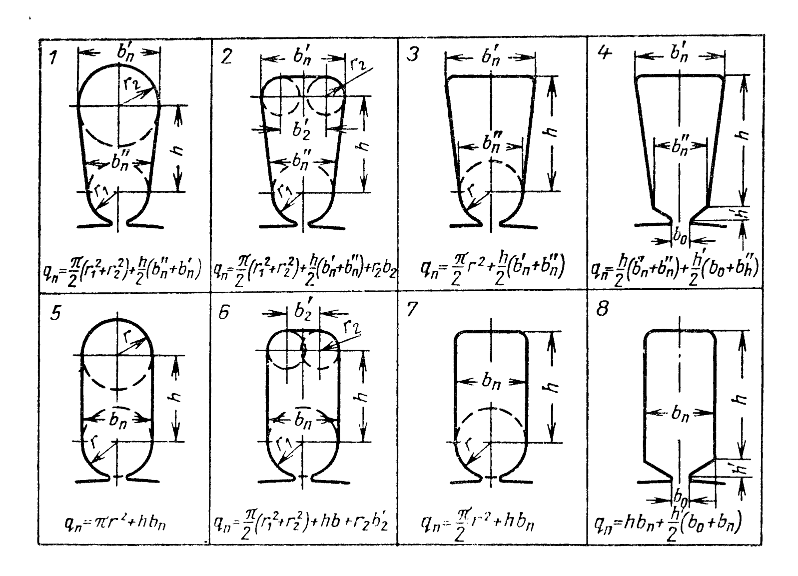


Рис. 5-10. Конструкции наиболее употребительных пазов и расчетные формулы.

Из равенства (5-53) видно, что сечение провода $q_{\text{эф}}$ зависит только от коэффициента заполнения паза $K_{\text{п}}$, так как $Q_{\text{п.св}}$ зависит от конфигурации паза и является

величиной постоянной для данного паза. Число витков в пазу $w_{п.эф}$ также является для данного паза постоянным, так как изменение его связано с изменением магнитных нагрузок, что является недопустимым. Таким образом, сечение активного витка зависит только от коэффициента заполнения паза. Чем выше $K_п$, тем больше сечение витков и мощность двигателя. $K_п < 1$, так как не вся активная площадь паза может быть заполнена активными витками. Часть площади паза занята пазовой и витковой изоляцией, пустотами между круглыми проводами и клином, закрывающим прорезь паза.

Поэтому на долю собственно обмотки остается только часть сечения паза.

Коэффициент заполнения паза определяется как отношение площади всех изолированных проводов в пазу ко всей площади паза в свету $Q_{п.св}$:

$$K_1 = \frac{w_{п.эф} q_{из}}{Q_{п.св}}, \tag{5-54}$$

где $q_{из}$ — сечение витка с изоляцией.

Можно определить коэффициент заполнения паза как отношение сечения меди без изоляции, расположенной в пазу, к площади паза в свету:

$$K_м = \frac{w_{п.эф} q_м}{Q_{п.св}}, \tag{5-55}$$

где $q_м$ — сечение витка без изоляции.

В зависимости от того, какой принят метод определения коэффициента заполнения паза, допускается различная его величина.

Первый метод менее точен, но проще и практичнее. В зависимости от конфигурации паза $K_1 = 0{,}37—0{,}45$ (табл. 5-9).

Таблица 5-9

Тип обмотки	Коэффициент K_1 при форме паза	
	трапециевидный	овальной
Однослойная	0,37—0,42	0,42—0,55
Двухслойная	0,35—0,40	0,37—0,45

Примечание. Данные таблицы даны для медных проводов, в случае применения алюминиевых проводов коэффициент заполнения паза может быть увеличен на 5%.

По второму методу $K_м$=0,27—0,30. При этом толщина пазовой изоляции принята 0,6 *мм* на сторону, а толщина изоляции проводов 0,22—0,27 *мм*.

В случае применения более тонкой пазовой и витковой изоляции коэффициент заполнения паза может быть увеличен, что будет рассмотрено отдельно. В дальнейшем для определения сечения витков с мягкими катушками будем определять коэффициент заполнения паза по первому способу по формуле (5-54).

Меньшие значения K соответствуют двигателям меньшей мощности.

Приближенное определение номинальной мощности электродвигателя. Номинальная мощность электродвигателя — это такой его режим работы, при котором температура обмотки статора и ротора не превышает установленных для данного класса пределов нагревостойкости при продолжительной работе. Предельно допустимые температуры обмоток электрических машин в зависимости от класса изоляции представлены в табл. 5-10.

Таблица 5-10

Классы изоляции по нагревостойкости	A	E	B	F	H
Предельно допустимые превышения температуры в зависимости от класса изоляции, ГОСТ 183-66	65° C	80° C	90° C	110° C	135° C

Примечание. Температура окружающей среды, измеряемая термометром, принимается не выше +35° С. При измерении температуры обмоток методом сопротивления предельно допустимая температура увеличивается на 5° С.

Так как допускается различный нагрев обмотки при разных указанных классах изоляции, в одних и тех же габаритах при прочих равных условиях можно получить различное значение номинальной мощности.

Определение мощности расчетным путем затруднительно, так как нельзя точно рассчитать температуру обмотки. Следовательно, если поступивший в ремонт двигатель не имеет паспортной таблички или перемотку производят с изменением скорости вращения, его мощность можно определить только приближенно. Окончательное значение мощности устанавливают только после тепловых испытаний электродвигателя.

Таблица 5-11

Коэффициент полезного действия и коэффициент мощности cos φ для асинхронных трехфазных электродвигателей мощностью до 100 *квт*

Мощность, *квт*	Электродвигатели защищенного исполнения с короткозамкнутым ротором								Электродвигатели закрытого обдуваемого исполнения с короткозамкнутым ротором							
	Скорость вращения (синхронная), *об/мин*															
	3 000	1 500	1 000	750	3 000	1 500	1 000	750	3 000	1 500	1 000	750	3 000	1 500	1 000	750
	К. п. д., %				cos φ				К. п. д., %				cos φ			
2,8	84,0	83,5	82,5	—	0,88	0,84	0,78	—	84,0	83,5	82,5	—	0,88	0,84	0,78	—
4,5	85,5	85,5	84,5	83,5	0,88	0,85	0,80	0,76	85,5	85,5	84,5	84,5	0,88	0,85	0,80	0,76
7,0	87,0	87,0	86,0	85,0	0,89	0,86	0,81	0,78	87,5	87,0	86,0	86,0	0,89	0,86	0,81	0,78
10	87,5	87,5	86,5	85,0	0,89	0,88	0,82	0,80	87,5	87,5	87,0	87,0	0,89	0,88	0,82	0,80
14	87,5	88,5	87,0	87,0	0,89	0,88	0,83	0,81	88,0	88,5	88,0	87,5	0,90	0,88	0,83	0,81
20	88,5	89,0	88,0	88,0	0,90	0,88	0,84	0,82	88,5	89,0	88,5	88,0	0,90	0,88	0,84	0,82
28	89,0	90,0	89,0	89,0	0,90	0,88	0,85	0,83	89,5	90,0	89,0	89,0	0,91	0,88	0,86	0,83
40	90,0	90,5	90,0	90,0	0,91	0,89	0,86	0,84	89,5	90,5	90,0	90,0	0,91	0,89	0,87	0,84
55	90,5	91,0	91,0	91,0	0,91	0,89	0,87	0,84	90,0	91,0	91,0	91,0	0,92	0,89	0,88	0,84
75	91,0	91,5	92,0	—	0,91	0,89	0,88	—	90,5	91,5	92,0	—	0,92	0,90	0,89	—
100	91,5	92,0	—	—	0,92	0,89	—	—	91,0	92,0	—	—	0,92	0,90	—	—

Различают кажущуюся и полезную (активную) мощность. Кажущаяся мощность — нагрузка, потребляемая из сети при номинальной нагрузке на валу двигателя:

$$P_к = \frac{3U_ф I_ф}{1\,000}, \ \text{ква}. \quad (5\text{-}56)$$

Полезная мощность равна:

$$P_2 = \frac{3U_ф I_ф \eta \cos\varphi}{1\,000} = \frac{\sqrt{3}\,U_л I_л \eta \cos\varphi}{1\,000}, \ \text{квт}. \quad (5\text{-}57)$$

Входящие в формулу (5-57) коэффициент мощности $\cos\varphi$ и коэффициент полезного действия η называются также экономическими показателями машины. Для предварительных расчетов они могут быть определены в зависимости от мощности P_2 по табл. 5-11.

5-3. ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ МОЩНОСТЬЮ ДО 100 *квт*, ИМЕЮЩИХ ПАСПОРТНУЮ ТАБЛИЧКУ И СТАРЫЕ ОБМОТОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Различают два типа поверочных расчетов: упрощенный и неполный.

Упрощенный поверочный расчет производится в случае, если величина максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ известна или может быть определена из каталога и имеются данные эксплуатации о нормальной работе электродвигателя до ремонта.

Расчет сводится к определению числа витков в пазу $w_{п.эф}$ и сечения провода $q_{эф}$. При совпадении обмоточных данных по расчету с данными до ремонта упрощенный поверочный расчет этим ограничивается.

Неполный поверочный расчет производится при отсутствии значения B_δ, его рекомендуется делать тогда, когда неизвестны причины выхода электродвигателя из строя. Этим расчетом определяются обмоточные данные, магнитные и электрические нагрузки.

В случае значительных расхождений обмоточных данных, полученных при расчете с данными до ремонта, наряду с магнитными и электрическими нагрузками определяют и ток холостого хода.

Сравнив величину тока холостого хода с данными по кривой на рис. 5-3, вводим поправку: если ток холостого хода, полученный расчетным путем, меньше тока, взятого по кривой, величину B_δ следует увеличить, и

наоборот. Производя дополнительный расчет, принимаем вариант, по которому получаем более правильную загрузку активных материалов и ток холостого хода. Сказанное разберем на примерах.

Пример упрощенного расчета. Электродвигатель завода ХЭМЗ, типа Т-1 500-9; $P_2 = 29$ *квт*; $2p = 4$; $U = 220/380$ *в*; $B_\delta = 0{,}66$ *тл*; $D_в = 220$ *мм*; $l = 265$ *мм*; $n_к = 2$; $b_к = 10$ *мм*; $z = 36$; $b''_п = 12$ *мм*; $b'_п = 14$ *мм*; $h_{пк} = 20$ *мм*. Определить $w_{п.эф}$ и диаметр обмоточного провода $d_{пр}$.

$$l_i = l - \frac{1}{2} n_{кs} b_к = 26{,}5 - \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot 10 = 25{,}5 \text{ см}.$$

Площадь продольного разреза:

$$l_i D_в = 25{,}5 \cdot 22 = 561 \text{ см}^2.$$

Число эффективных проводов на паз условного двигателя по кривой на рис. 5-2 $w_{п.ус} = 9{,}3$. Поправочные коэффициенты: $C_1 = 0{,}91$; $C_2 = 1$.

$$w_{п.эф} = w_{п.ус} C_1 C_2 = 9{,}3 \cdot 0{,}93 = 8{,}45.$$

По заводским данным $w_{п.эф} = 8{,}5$.

Сечение паза в свету

$$Q_{п.св} = \frac{h_{п.к}}{2} (b''_п + b'_п) = \frac{22}{2} (12 + 14) = 286 \text{ мм}^2.$$

Сечение эффективного витка с изоляцией

$$q_{эф} = \frac{Q_{п.св} K_1}{w_{п.эф}} = \frac{286 \cdot 0{,}4}{8{,}5} = 13{,}5 \text{ мм}^2.$$

Так как 8,5 витков выполнить невозможно, возьмем две параллельные ветви и каждый виток выполним из двух параллельных проводов:

$$w_{п.эл} = w_{п.эф} a_1 a_2 = 8{,}5 \cdot 2 \cdot 2 = 34 \text{ проводника}.$$

Сечение проводника с изоляцией

$$q_{п.из} = \frac{q_{эф.из}}{a_1 a_2} = \frac{13{,}5}{2 \cdot 2} = 3{,}38 \text{ мм}^2.$$

Диаметр провода с изоляцией

$$d_{п.из} = \sqrt{\frac{4 q_{п.из}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3{,}38}{3{,}14}} = 2{,}08 \text{ мм}.$$

Диаметр провода без изоляции

$$d_п = 2{,}08 - 0{,}26 = 1{,}82 \text{ мм; берем по стандарту } d_п = 1{,}81 \text{ мм}.$$

Так как данные расчета совпадают с заводскими, поверочный расчет может быть этим ограничен.

Пример неполного расчета. Провести поверочный расчет асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, типа МТ-81-8; мощностью 17 *квт*; $2p=8$; $U=220/380$ *в*, $I=62{,}5/36{,}1$ *а*.

Данные электродвигателя: $D_н=385$ *мм*; $D_в=280$ *мм*; $l=140$ *мм*; $\delta=0{,}55$ *мм*; $z=72$; $h_п=31{,}3$ *мм*; $b_п'=8{,}5$ *мм*; $b''_п=6{,}7$ *мм*; $w_{п.эл}=26$; $a_1=1$; $a_2=2$; $y=1—10$; $d_м=1{,}88$ *мм*; $d_{из}=2{,}15$ *мм*.

Зубцовый шаг статора

$$t=\frac{\pi D_в}{z}=\frac{3,14\cdot 28}{72}=1,22 \text{ см}.$$

Ширина зубца статора

$$b_z=t_z-b''_п=1,22-0,67=0,55 \text{ см}.$$

Высота спинки статора

$$h_а=\frac{1}{2}(D_н-D_в-2h_z)=\frac{38,5-28-2\cdot 3,13}{2}=2,12 \text{ см}.$$

Расчетная длина активной стали

$$l=l_i=14,0 \text{ см}.$$

Чистая длина активной стали

$$l_0=l_i k_ж=14,0\cdot 0,95=13,3 \text{ см}.$$

Средняя длина магнитных силовых линий в спинке статора на один полюс

$$L_а=\frac{\pi(D_н-h_а)}{4p}=\frac{3,14(38,5-2,12)}{16}=7,1 \text{ см}.$$

Коэффициент воздушного зазора

$$k_c=\frac{t_z+10\delta}{b_z+10\delta}\cdot\frac{t_{zр}+10\delta}{b_{zр}+10\delta}=1,1.$$

Число эффективных проводов в пазу

$$w_{п.эф}=\frac{w_{п.эл}}{a_1 a_2}=\frac{26}{1\cdot 2}=13.$$

Максимальная магнитная нагрузка в воздушном зазоре

$$B_\delta=\frac{2,7\cdot 10^2 U p}{D_в l_i z w_{п.эф}}=\frac{2,7\cdot 10^2\cdot 220\cdot 4}{28\cdot 14\cdot 72\cdot 13}=0,645 \text{ тл}.$$

Магнитная индукция в спинке статора

$$B_а=\frac{D_в l_i B_\delta}{2pl_0 h_а}=\frac{28\cdot 14\cdot 0,645}{8\cdot 13,3\cdot 2,12}=1,12 \text{ тл}.$$

Магнитная индукция в зубцах статора

$$B_z=\frac{t_z l_i}{b_z l_0}B_\delta=\frac{1,22\cdot 14\cdot 0,645}{0,55\cdot 13,3}=1,5 \text{ тл}.$$

Сечение эффективного витка

$$q_{эф} = \frac{\pi d_м}{4} \cdot 2 = \frac{3,14 \cdot 1,88^2}{4} \, 2 = 5,5 \; мм^2 \cdot$$

Плотность тока

$$\Delta = \frac{I_ф}{q_{эф}} = \frac{36 \cdot 1}{5,5} = 6,55 \; а/мм^2.$$

Линейная нагрузка

$$AS = \frac{I_ф w_{п.эф}}{t_z} = \frac{36,1 \cdot 13}{1,22} = 385 \; а/см.$$

Фактор пропорциональности перегрева обмотки статора

$$\Delta AS = 6,55 \cdot 385 = 2\,522.$$

Намагничивающая сила воздушного зазора на полюс

$$F_\delta = 0,8 k_c B_\delta \delta \cdot 10^4 = 0,8 \cdot 1,1 \cdot 0,645 \cdot 0,055 \cdot 10^4 = 314 \; а.$$

Намагничивающая сила спинки статора

$$F_а = H_а L_а = 3,44 \cdot 7,1 = 24,5 \; а,$$

$H_а$ — удельная намагничивающая сила для индукции в спинке 1,12 *тл,* по табл. 5-7 — 3,44 *а/см.*

Намагничивающая сила зубцов статора

$$F_Z = H_Z h_Z = 25 \cdot 3,13 = 78 \; а.$$

H_z — удельная намагничивающая сила для индукции в зубцах 1,5 *тл*, по табл. 5-8 — 25 *а/см.*

Намагничивающая сила статора

$$F_{ст} = F_а + F_Z = 78 + 24,5 = 102,5 \; а.$$

Намагничивающая сила ротора

$$F_р = 0,9 \, F_{ст} = 0,9 \cdot 102,5 = 92,5 \; а.$$

Намагничивающая сила холостого хода на полюс

$$F_{х.х} = F_{ст} + F_р + F_\delta = 102,5 + 92 + 314 = 508,5 \; а.$$

Намагничивающий ток

$$I_\mu = \frac{0,82 \, p F_{х.х}}{w_{п.эф} \frac{z}{6}} = \frac{0,82 \cdot 4 \cdot 508,5}{13 \cdot \frac{72}{6}} = 10,7 \; а.$$

Ток холостого хода

$$I_{х.х} = (1,01 \div 1,05) \, I_\mu = 11,0 \; а.$$

$$\frac{I_{х.х}}{I_{ном}} \cdot 100 = \frac{11,0}{36,1} \cdot 100 = 30,5\,\%.$$

По кривой рис. 5-3 значение тока холостого хода для двигателя 17 *квт* 750 *об/мин* равно 65%. Полученное по расчету значение тока холостого хода 30,5% свидетельствует о том, что активная сталь двигателя недогружена и паспортная мощность двигателя обеспечивалась за счет значительного увеличения электрических нагрузок, что и явилось причиной выхода его из строя.

Увеличим магнитную индукцию в воздушном зазоре до 0,75 *тл* и проведем повторный расчет:

$$B_а = \frac{D_в l_i}{2pl_0h_а} B_\delta = \frac{28\cdot 14}{8\cdot 13,3\cdot 2,12}\cdot 0,75 = 1,33 \text{ тл}.$$

$$B_Z = \frac{t_Z l_i}{b_Z l_0} B_\delta = \frac{1,22\cdot 14}{0,55\cdot 13,3}\cdot 0,75 = 1,73 \text{ тл}.$$

$$w_{п.эф} = \frac{2,7Up\cdot 10^2}{D_в l_i z B_\delta} = \frac{2,7\cdot 220\cdot 4\cdot 10^2}{28\cdot 14\cdot 72\cdot 0,75} = 10,5.$$

$$q_{м.нов} = \frac{q_{м.ст}w_{п.эф.ст}}{w_{п.эф.нов}} = \frac{5,5\cdot 13}{10,5} = 6,9 \text{ мм}^2.$$

$$\Delta_{нов} = \frac{I_ф}{q_{м.нов}} = \frac{36,1}{6,9} = 5,25 \text{ а/мм}^2.$$

$$AS = \frac{I_ф w_{п.эф}}{t_Z} = \frac{36,1\cdot 10,5}{1,22} = 310 \text{ а/см},$$

$$\Delta AS = 5,25\cdot 310 = 1\,640.$$

$$F_\delta = 0,8k_c B_\delta \delta\cdot 10^4 = 0,8\cdot 1,1\cdot 0,75\cdot 0,0,55\cdot 10^4 = 365 \text{ а}.$$

$$F_а = H_а L_а = 5,46\cdot 7,1 = 38 \text{ а}.$$

При $B_а = 1,33$ *тл* $H_а = 5,46$ *а/см*.

$$F_Z = H_Z h_Z = 90,3\cdot 3,13 = 280 \text{ а}.$$

При $B_Z = 1,73$ *тл*; $H_Z = 90,3$ *а/см*.

$$F_{ст} = F_а + F_Z = 38 + 280 = 318 \text{ а}.$$

$$F_р = 0,9\ F_{ст} = 0,9\cdot 318 = 287 \text{ а}.$$

$$F_{х.х} = F_{ст} + F_р + F_\delta = 318 + 287 + 365 = 961 \text{ а},$$

$$I_\mu = \frac{0,82pF_{х.х}}{w_{п.эф}\frac{z}{6}} = \frac{0,82\cdot 4\cdot 961}{10,5\cdot 12} = 25 \text{ а}.$$

$$I_{х.х} = 1,01 I_\mu = 1,01\cdot 25 = 25,25 \text{ а}.$$

$$\frac{I_{х.х}}{I_{ном}}\cdot 100 = \frac{25,25}{36,1}\cdot 100 = 70\ \%.$$

Так как ток холостого хода близок к данным по кривой рис. 5-3, а электрические и магнитные нагрузки находятся в пределах норм, то расчет можно считать законченным.

5-4. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ОБМОТОЧНЫХ ДАННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ, НЕ ИМЕЮЩЕГО ПАСПОРТНОЙ ТАБЛИЧКИ И СТАРОЙ ОБМОТКИ

В предыдущих расчетах, имея паспортные и обмоточные данные машины, легко определяли электрические и магнитные нагрузки активных материалов, которые в ходе расчетов мы стремились сохранить. В случае отсутствия паспортной таблички и старой обмотки расчет усложняется. Как было сказано ранее, основой всего расчета является правильный выбор величины B_δ, которая задается в широких пределах 0,45—0,9 *тл*, а нам необходимо задаться оптимальным значением B_δ, обеспечивающим оптимальное значение всех других величин.

Окончательно правильность выбора величины B_δ может быть установлена лишь после испытания электродвигателя на холостом ходу.

В случае, если ток холостого хода больше, чем по кривым предельных значений (рис. 5-3), величину B_δ следует уменьшить, т. е. необходимо увеличить число витков, и наоборот. Не исключена возможность, что при второй и даже третьей пробе не будет установлено действительное значение B_δ. Естественно, что такой нерациональный способ подбора B_δ неприемлем. Оптимальное значение B_δ может быть определено графически следующим способом.

Задаемся тремя произвольными значениями максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре B_{δ_1}, B_{δ_2}, B_{δ_3}. По формуле (5-25) определяем $w_{п.эф1}$; $w_{п.эф2}$; $w_{п.эф3}$; произведя полный расчет, определяем полезную мощность P_{2-1}, P_{2-2}, P_{2-3} и ток холостого хода $I_{х.х1}$, $I_{х.х2}$, $I_{х.х3}$. На основании этих данных строим зависимость $P_2 = f(I_{х.х}/I_{ном})$ (кривая *1* рис. 5-11). Для тех же значений P_{2-1}, P_{2-2}, P_{2-3} находим $\frac{I_{х.х}}{I_{ном}}1$; $\frac{I_{х.х}}{I_{ном}}2$; $\frac{I_{х.х}}{I_{ном}}3$ по кривой предельных значений рис. 5-3 и строим кривую *2* рис. 5-11.

Точка пересечения двух кривых *K* определяет оптимальную мощность, которая может быть получена от данного двигателя при данных габаритах и скорости вращения.

Если через точку *K* провести линию *MN* перпендикулярно оси абсцисс, получим линию оптимальных параметров, так как любая зависимость, выраженная кривой, пересекающейся с *MN*, дает оптимальное значение.

На рис. 5-11 даны еще две зависимости: кривая *3* — максимальная магнитная индукция в воздушном зазоре B_δ в зависимости от мощности и кривая *4* — зависимость числа витков в пазу от мощности. При пересечении кривых с линией оптимальных параметров получаем точки *а*, *б* и *К*.

М—а—расстояние от оси абсцисс до кривой есть оптимальное значение максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ; *М—б* — выражает в масштабе оптимальное значение числа витков; *М—К*—оптимальное значение $I_{х.х}$, %.

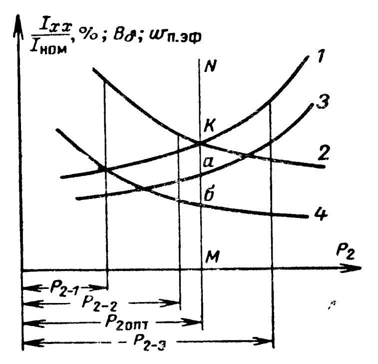


Рис. 5-11. Определение оптимальных значений B_δ, $W_{п.эф}$, $I_{х.х}$ (%).

Этим методом расчета можно воспользоваться и при пересчете электродвигателя на другую скорость вращения.

Для восстановления паспорта и расчета обмоточных данных необходимо определить исполнение электродвигателя, наличие вентилятора, изоляцию листов, сорт и толщину активной стали.

В зависимости от перечисленных факторов задаемся плотностью тока статора Δ и ротора $\Delta_р$, линейной нагрузкой AS и удельными потерями в активной стали.

Пример. Определить оптимальную величину максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре (электродвигатель не имеет паспорта и обмоток). Известна скорость вращения $n_c = 1\,000$ *об/мин.*

Данные обмера:

$D_н = 395$ *мм*; $D_в = 240$ *мм*; $D_{н.р} = 238{,}9$ *мм*; $D_{в.р} = 141$ *мм*; $l = 141$ *мм*; $n_к = 2$; $b_к = 10$ *мм*; $\delta = 0{,}55$ *мм*; $d_в = 45$ *мм*; $t_Z = 1{,}4$ *см*; $t_{Zр} = 1$ *см*; $h_{п.к} = 23{,}8$; $h_{п.к.р} = 21$ *мм*; $h_а = 23{,}5$ *мм*; $h_р = 25$ *мм*; $b'_п = 10{,}5$ *мм*; $b''_п = 7{,}8$ *мм*; $b_{п.р} = 6$ *мм*; $b_Z = 6{,}15$ *мм*; $b'_{Zр} = 4{,}4$ *мм*; $b''_Z = 4$ *мм*; $z = 54$; $z_р = 72$.

Толщина листов активной стали статора и ротора 0,5 *мм*. Двигатель должен быть намотан на напряжение 220/380 *в*.

Средняя ширина паза статора

$$b_{п.ср} = \frac{b'_п + b''_п}{2} = \frac{10{,}5 + 7{,}8}{2} = 9{,}15 \text{ мм}.$$

Число пар полюсов

$$p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1\,000} = 3.$$

$$q = \frac{54}{6 \cdot 3} = 3; \quad q_р = \frac{72}{6 \cdot 3} = 4;$$

$$l_i = l - 0{,}5 n_к b_к = 26{,}5 - 0{,}5 \cdot 2{,}1 = 25{,}5 \ см.$$

$$l_0 = (l - n_к b_к)\, k_ж = (26{,}5 - 2{,}1) \cdot 0{,}95 = 23{,}5 \ см.$$

Задаемся произвольно тремя значениями B_δ — 0,5 *тл*, 0,65 *тл* и 0,80 *тл* и проведем для них расчет:

На основании полученных данных строим кривые рис. 5-12. Находим оптимальные значения параметров:

$$B_\delta = 0{,}663 \ тл; \ w_{п.эф} = 8{,}5; \ q_{эф} \simeq 9{,}3 \ мм^2; \ AS\Delta = 1\,410; \ I_{х.х} =$$

$$= 58\,\%; \ I_{ном} = 46{,}4 \ а; \ P_а = 23{,}2 \ квт.$$

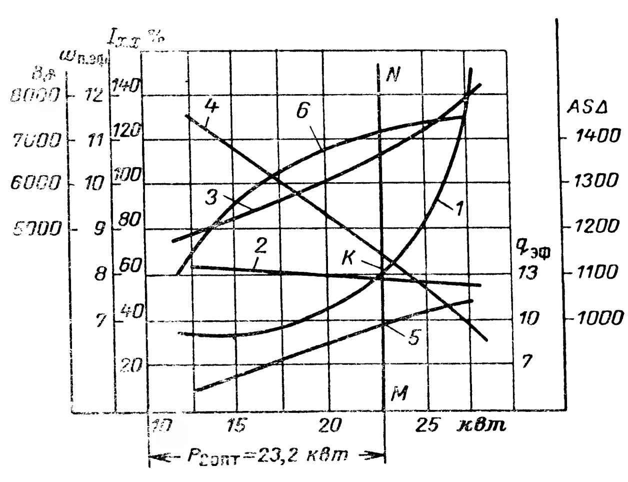


Рис. 5-12. Определение оптимальных значений параметров двигателя.

1 — зависимость мощности P_2 от тока холостого хода (из расчета); *2* — то же по графикам предельных значений; *3* — зависимость $B\delta$ от P_2; *4* — зависимость $w_{п.эф}$ от P_2; *5* — зависимость $q_{эф}$ от P_2; *6* — зависимость $AS\Delta$ от P_2.

Расчет фазного ротора

Число эффективных витков в фазе ротора равно:

$$w_{эф.р} = w_{эф} \frac{k_{\omega р} U_{ф.р}}{k_\omega U_ф} = 76{,}5 \cdot \frac{0{,}958 \cdot 168}{0{,}902 \cdot 220} = 61{,}8,$$

$k_\omega = 0,902$ и $k_{\omega р} = 1,958$ — обмоточные коэффициенты статора и ротора, рассчитываются по специальным формулам (а также могут быть взяты по таблицам, составленным в зависимости от величин z, m и $2p$).

В соответствии с табл. 5-5 задаемся $U_{л.р} = 290$ *в* (Y), тогда $U_{ф.р} = \frac{290}{\sqrt{3}} = 168$ *в*; $w_{эф} = w_{п.эф} \frac{z}{6} = 8,5 \frac{54}{6} = 76,5$ витка; $w_{п.эф.р} = \frac{2mw_{эф.р}}{z_р} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 61,8}{72} = 5,15$, принимаем 5.

$$w_{эф.р} = \frac{5 \cdot 72}{6} = 60.$$

Уточненное

$$U_л = \frac{5}{5,15} \cdot 290 = 282 \text{ в}.$$

$$I_{фр} = (0,85 - 0,9)\ I_ф \frac{w_{эф}k_\omega}{w_{эф.р}k_{\omega р}} = 0,87 \frac{46,4 \cdot 76,5 \cdot 0,958}{60 \cdot 0,902} = 54 \text{ а}.$$

$$q_{эф.р} = \frac{I_{ф.р}}{\Delta_р} = \frac{54}{6,5} = 8,3 \text{ мм}^2;\ d_{м.р} = 3,25 \text{ м},$$

берем 3,28; $\Delta_р$ берем 6,5 *а/мм²*.

$$K_{пр} = \frac{q_{эф}w_{п.эф.р}}{b_{пр}h_р} = \frac{3,14\,(3,25 + 0,30)^2 \cdot 5}{4 \cdot 6,21} = 0,398.$$

Расчетные формулы	B_δ, *тл*		
	0,5	0,68	0,8
$w_{п.эф} = \frac{2,7Up \cdot 10^2}{zl_iD_вB_\delta}$	11,3	8,7	7,0
$B_а = \frac{D_вl_iB_\delta}{2pl_0h_а}$, *тл*	1,02	1,32	1,63
$B_z = \frac{t_zl_iB_\delta}{l_0b_z}$, *тл*	1,25	1,625	2,0
$L_а = \frac{\pi(D_н - h_а)}{4p}$, *см*	8,2	8,2	8,2
Удельная намагничивающая сила, *а/см* (табл. 5-7)	2,74	5,33	15,9
$F_а = H_аL_а$, *а*	22,6	43,6	130
Удельная намагничивающая сила, *а/см* (табл. 5-8)	9,76	50,6	310
$F_z = H_zh_z$, *а*	23	120	710

Расчетные формулы	B_δ, *тл*		
	0,5	0,68	0,8
$F_{ст} = F_a + F_z$, *а*	45,6	163,6	840
$F_р = 0{,}9F_{ст}$, *а*	41	147	756
$k_c = \frac{t_z + 10\delta}{b_z + 10\delta} + \frac{t_{zр} + 10\delta}{b_{zр} + 10\delta}$	1,36	1,36	1,36
$F_\delta = 0{,}8k_c B_\delta \delta \cdot 10^4$	300	380	480
$F_{х.х} = F_{ст} + F_р + F_\delta$	386	700	2 076
$I_{х.х} \approx 1{,}03I_\mu = 1{,}03 \frac{0{,}82pF_{х.х}}{w_{п.эф}\frac{z}{6}}$, *а*	9,6	22,8	83
Задаемся плотностью тока, *а/мм*²	5	5	5
$w_{п.эл} = w_{п.эф} a_1 a_2$	40	26	28
a_1 — число параллельных проводов a_2 — число параллельных ветвей	3 1	3 1	2 2
Коэффициент заполнения паза K_1	0,45	0,45	0,45
$q_{п.из} = \frac{K_1 b_{ср} h_п}{w_{п.эл}}$, *мм*²	2,45	3,77	3,5
$d_{п.из} = \sqrt{\frac{4q_{п.из}}{\pi}}$, *мм*	1,73	2,2	2,12
$d_п = d_{п.из} - 0{,}25$, *мм*	1,48	1,95	1,87
$q_м = \frac{\pi d_п^2}{4}$, *мм*	1,72	3	2,74
$I_ф = a_1 a_2 q_м \Delta$, *а*	25,8	45	55
$P_2 = \sqrt{3} U_л I_л \eta \cos\varphi\eta$, *квт*	12,8	22,3	27,1
$\frac{I_{х.х}}{I_ф} \cdot 100$, %	37,96	51	150
$AS = \frac{I_ф w_{п.эф}}{t_z}$, *а/см*	209	280	285
ΔAS	1 040	1 400	1 420

Задаемся $S = 3\%$. Тогда скорость вращения ротора

$$n = n_c\left(1 - \frac{S}{100}\right) = 1\,000\left(1 - \frac{3}{100}\right) = 970 \text{ об/мин}.$$

Номинальные (паспортные) данные:

$U = 220/380$ *в*, $P_2 = 23{,}2$ *квт*, $n = 970$ *об/мин*, $I_{ном} = 46{,}4$ *а*.

5-5. ПЕРЕСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА НА ДРУГОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Пересчет обмотки статора на новое напряжение без изменения параметров двигателя (мощность, скорость вращения, $\cos\varphi$, объем тока в пазу) возможен только в том случае, если площадь, занимаемая пазовой и витковой изоляцией, в результате пересчета не увеличивается. При пересчете на более низкое напряжение это условие выполнимо всегда, в случае пересчета на более высокое напряжение оно может быть соблюдено лишь при увеличении напряжения со 120/220 до 500 *в*.

Для сохранения параметров двигателя без изменения надо, чтобы магнитный поток Ф и объем тока в пазу до и после перемотки оставались без изменения.

Из этого условия следует:

1) $\dfrac{w_{п.эф.ст.}}{w_{н.эф.нов}} = \dfrac{U_{ст}}{U_{нов}}$;

$$w_{п.эф.нов} = w_{п.эф.ст}\frac{U_{нов}}{U_{ст}}; \qquad (5\text{-}58)$$

$w_{п.эф.ст}$, $w_{п.эф.нов}$ — число эффективных проводов в пазу при старом и новом напряжениях;

$U_{ст}$, $U_{нов}$ — старое и новое напряжение.

2) $w_{п.эф.ст}q_{эф.ст} = w_{п.эф.нов}q_{эф.нов}$, откуда

$$q_{эф.нов} = \frac{w_{п.эф.ст}}{w_{п.эф.нов}}\,q_{эф.ст},\ мм^2, \qquad (5\text{-}59)$$

где $q_{эф.нов}$ и $q_{эф.ст}$ — новое и старое сечение эффективного витка.

Пример. Требуется перемотать электродвигатель напряжением 127/220 *в* на напряжение 220/380 *в*. Обмотка — двухслойная, соединение фаз треугольник — звезда (Δ/Y). Число эффективных проводов в пазу — 24.

Диаметр обмоточного провода — 1,63 *мм*.

Сечение провода

$$q_{пр} = \frac{\pi d_м^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 1{,}63^2}{4} = 2{,}06\ мм;$$

$$w_{п.эф.нов} = w_{п.эф.ст}\frac{U_{нов}}{U_{стар}} = 24\,\frac{230}{120} = 41{,}6 \text{ витка},$$

берем 42 витка.

Таким образом, уменьшение магнитного потока будет пропорционально 42/41,6=1,015, т. е. в пределах 1%, что вполне допустимо:

$$q_{эф.нов} = q_{эф.стар} \frac{w_{п.эф.стар}}{w_{п.эф.нов}} = 2,06 \frac{24}{42} = 1,18 \text{ мм}^2;$$

$$d_м = \sqrt{\frac{4s}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,18}{3,14}} = 1,23 \text{ мм}.$$

По имеющимся стандартам такого провода нет, принимаем два провода $d = 0,86$ *мм*:

$$q_{эф.нов} = 2 \frac{\pi d_м^2}{4} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,86^2}{4} = 1,162 \text{ мм}.$$

Это меньше необходимого на 1,5 % (вполне допускается ± 5 %).

5-6. ПЕРЕСЧЕТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ДРУГУЮ НОМИНАЛЬНУЮ СКОРОСТЬ ВРАЩЕНИЯ

Скорость вращения двигателя из формулы (1-1)

$$n = \frac{6\,000}{2p},$$

откуда видно, что скорость вращения зависит только от числа полюсов. Поэтому для изменения скорости вращения электродвигателя необходимо изменить число полюсов. Это достигается изменением шага обмотки и числа катушечных групп в фазе.

Перевод электродвигателя на другую скорость при неизменных напряжении, частоте и индукции в воздушном зазоре связан с изменением магнитного потока, который изменяется обратно пропорционально числу полюсов.

Мощность электродвигателя на валу с заданными размерами активной стали

$$P_2 = KASnB_\delta, \tag{5-60}$$

где K — коэффициент, зависящий от геометрии машины.

Отсюда

$$P_{2нов} = P_{2стар} \frac{n_{нов} B_{\delta\,нов}}{n_{стар} B_{\delta\,стар}}. \tag{5-61}$$

Из (5-61) видно, что мощность пропорциональна изменению скорости вращения и величине B_δ. В случае, если $B_{\delta нов} = B_{\delta стар}$, мощность двигателя практически изменяется пропорционально изменению скорости вращения.

Высота спинки статора h_a равна:

$$h_a = \frac{D_в l_i B_\delta}{l_0 \cdot 2pB_a}, \ см. \quad (5\text{-}62)$$

Отсюда можно сделать вывод: двигатели, имеющие равные габариты и величины магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ и в спинке B_a, должны иметь различную высоту спинки статора в зависимости от скорости вращения. Высота спинки статора обратно пропорциональна числу полюсов $2p$. Чем быстроходней двигатель, чем меньше число полюсов, тем больше спинка статора.

Для определения наименьшего числа полюсов, допустимого для данного электродвигателя, можно пользоваться приближенной формулой (5-63), полученной из (5-39) при следующих упрощениях:

$$l_i = l_0; \ B_\delta = 0{,}5B_a;$$

$$2p = 0{,}5 \frac{D_в}{h_a}. \quad (5\text{-}63)$$

Полученный результат округляют до ближайшего целого четного числа в сторону увеличения.

Из равенства (5-39) следует, что наиболее загруженной частью активной стали двигателя при переходе на повышенную скорость вращения является спинка. Следовательно, из условия магнитной загрузки спинки и необходимо выбирать величину B_δ.

При переходе на большую скорость вращения необходимо проверить окружную скорость ротора

$$V_р = \frac{\pi D_р n}{60 \cdot 1\,000}, \ м/сек,$$

которая не должна превышать 30—40 *м/сек,* а для короткозамкнутого ротора 40—60 *м/сек.*

В отличие от увеличения скорости вращения, где в процессе расчета приходится уменьшать величину B_δ, при уменьшении скорости вращения, сохранение величины B_δ затруднений не встречает. Увеличение числа полюсов вызывает уменьшение полюсного деления τ, что в свою очередь приводит к уменьшению магнитного потока. Магнитная индукция в спинке снижается. Мощность уменьшается пропорционально изменению скорости вра-

щения. Однако в некоторых случаях, когда зубец недогружен, при уменьшении скорости вращения мощность может уменьшиться не пропорционально уменьшению скорости вращения, а в меньшей степени.

Так как при этом индукцию в зубцах следует увеличить, то величину B_δ выбирают из условия магнитной загрузки зубцов. Но при этом следует учитывать, что при уменьшении скорости вращения ухудшаются условия охлаждения, что может увеличить температуру нагрева зубцового слоя.

Расчет обмоточных данных при перемотке с увеличением скорости вращения. При демонтаже обмотки двигателя определяют: $w_{\text{п.эф.стар}}$, $q_{\text{эф.стар}}$, сопряжение фаз (Δ/Y), $y_{\text{стар}}$, z.

На основании этих данных определяют: Q_δ, $Q_\text{а}$, Q_z, магнитные и электрические нагрузки.

Если спинка предельно загружена, то при пересчете индукция в спинке $B_\text{а}$ остается без изменения, т. е. $B_{\text{а.стар}}=B_{\text{а.нов}}$, отсюда из (5-39) получим:

$$\frac{D_\text{в} l_i}{2p_{\text{нов}} h_\text{а}} B_{\delta\ \text{нов}} = \frac{D_\text{в} l_i}{2p_{\text{стар}} h_\text{а}} B_{\delta\text{стар}},$$

откуда

$$B_{\delta\ \text{нов}} = \frac{p_{\text{нов}}}{p_{\text{стар}}} B_{\delta\text{стар}},\ \textit{тл}.$$

При этом, несмотря на увеличение скорости вращения, мощность двигателя практически остается без изменения. Если же спинка статора недогружена, можно увеличить мощность двигателя пропорционально увеличению магнитной индукции в спинке $B_\text{а}$.

Из равенства (5-39) имеем:

$$B_\delta = \frac{2p \cdot l_0 h_\text{а}}{D_\text{в} l_i} B_\text{а},\ \textit{тл}. \qquad (5\text{-}64)$$

Задавшись величиной $B_\text{а}$, по табл. 5-6 определяем B_δ из формулы (5-64). Зная B_δ, определяем остальные данные двигателя.

Пример. Пересчитать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором 14 *квт*, 220/380 *в*, $\cos\varphi=0{,}77$; к. п. д. 86,5%; $2\ p=8$, для работы при $2\ p=6$ со степенью загрузки активных материалов, обеспечивающей повышение мощности.

Данные электродвигателя: $D_н = 368$ *мм*; $D_в = 260$ *мм*; $l = 185$ *мм*; $z = 48$; $q = 2\frac{1}{4}$; $h_а = 24,2$ *мм*; $h_п = 29,8$ *мм*; $b' = 8,7$ *мм*; $b'' = 11,8$ *мм*; $w_{п.эф} = 12$; $a_1 = 4$; $d_м = 1,5$ *мм*; $y = 6$.

$$l_i = l - \frac{2}{3} n_к b_к = 18,5 \text{ см};$$

$$l_0 = (l - n_к b_к) k_ж = 18,5 \cdot 0,95 = 17,6 \text{ см};$$

$$t_z = \frac{\pi D_в}{z} = \frac{3,14 \cdot 26 \cdot 8}{48} = 1,56 \text{ см};$$

$$b_z = t_z - b'_п = 1,56 - 0,87 = 0,69 \text{ см};$$

$$q_{эф} = a_1 a_2 q_п = 1 \cdot 4 \frac{3,14 \cdot 1 \cdot 5^2}{4} = 7,1 \text{ мм}^2.$$

Определение магнитных и электрических нагрузок до перемотки

$$B_\delta = \frac{2,7Up \cdot 10^2}{D_в l_i z w_{п.эф}} = \frac{2,7 \cdot 220 \cdot 4 \cdot 10^2}{26 \cdot 18,5 \cdot 54 \cdot 12} = 0,75 \text{ тл};$$

$$B_а = \frac{D_в l_i B_\delta}{2pl_0 h_а} = \frac{26 \cdot 18,5}{8 \cdot 17,6 \cdot 2,42} \cdot 0,75 = 1,05 \text{ тл};$$

$$B_z = \frac{t_z l_i}{b_z l_0} B_\delta = \frac{1,56 \cdot 18,5}{0,69 \cdot 17,6} \cdot 0,75 = 1,78 \text{ тл};$$

$$\Delta = \frac{I_ф}{q_{эф}} = \frac{31,8}{7,1} = 4,5 \text{ а/мм}^2.$$

$$AS = \frac{I_ф w_{п.эф}}{t_z} = \frac{31 \cdot 8 \cdot 12}{1 \cdot 56} = 250 \text{ а/ам};$$

$$\Delta AS = 250 \cdot 4,5 = 1\,150.$$

Для исходного двигателя $B_а = 1,05$ *тл*, поэтому при перемотке на 1 000 *об/мин* имеется возможность повысить его мощность. Задаемся величиной магнитной индукции в спинке 1,35 *тл*, что вполне допустимо. Определим величину максимальной магнитной индукции B_δ из (5-39):

$$B_\delta = \frac{2pl_0 h_а}{D_в l_i} B_а = \frac{6 \cdot 17,6 \cdot 2,42}{26 \cdot 18,5} \cdot 1,35 = 0,7150 \text{ тл};$$

$$B_z = \frac{t_z l_i}{b_z l_0} B_\delta = \frac{1,56 \cdot 18,5}{0,69 \cdot 17,6} \cdot 0,715 = 1,7 \text{ тл};$$

$$w_{п.эф.нов} = \frac{p_{нов}}{p_{стар}} \frac{B_{\delta стар}}{B_{\delta нов}} w_{п.эф.ст} = \frac{3}{4} \frac{7\,800}{7\,150} \cdot 12 \approx 10 \text{ витков}.$$

$$q_{эф.нов} = \frac{w_{п.эф.стар}}{w_{п.эф.нов}} q_{эф.стар} = \frac{12}{10} \cdot 7,1 = 8,55 \text{ мм}^2.$$

Берем $a_1 = 3$, тогда

$$q_п = \frac{q_{эф.нов}}{a_1} = \frac{8,55}{3} = 2,85\ мм^2;$$

$$d_п = \sqrt{\frac{4q_п}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,85}{3,14}} = 1,91\ мм,\ берем\ 1,88\ мм.$$

$$q_{эф} = 3\frac{\pi d_м^2}{4} = 3\frac{3,14 \cdot 1,88^2}{4} = 8,3\ мм^2;$$

$$P_{2нов} = \frac{B_{\delta нов}\, n_{нов}}{B_{\delta стар} n_{стар}} P_{2стар} = \frac{0,715 \cdot 1\,000}{0,78 \cdot 7\,500} \cdot 14 = 17,3\ квт;$$

$$I_ф = \frac{P_{2нов}}{U\sqrt{3}\cos\varphi\eta} = \frac{17,3}{380 \cdot 1,73 \cdot 0,865 \cdot 0,77} = 39,6\ а;$$

$$\Delta_{нов} = \frac{I_{ф.нов}}{q_{эф.нов}} = \frac{39,6}{8,3} = 4,75\ а/мм^2;$$

$$AS_{нов} = \frac{I_{ф.нов} w_{эф.нов}}{t_z} = \frac{39,6 \cdot 10}{1,56} = 250\ а/мм^2;$$

$$\Delta_{нов} AS_{нов} = 4,75 \cdot 250 = 1\,180.$$

При подсчете P_2 было, принято, что $\cos\varphi$ и к. п. д. остались без изменения. Таким образом, при увеличении скорости вращения на 33% мощность увеличилась на 22%.

Повышение скорости вращения электродвигателя несколько увеличивает нагрев подшипников, однако при этом увеличивается охлаждение электродвигателя вентиляцией.

При увеличении скорости вращения увеличивается шаг обмотки, что вызывает увеличение вылета лобовых частей. Поэтому необходимо проверить расстояние от обмотки до щита электродвигателя, обеспечивающее необходимый зазор для данного напряжения.

Расчет обмоточных данных при перемотке с уменьшением скорости вращения. Если индукция в зубцах B_z имеет предельную величину, то весь расчет основан на постоянстве величины B_z до и после ремонта, т. е. $B_{z\,нов} = B_{z\,стар}$, отсюда из формулы (5-36)

$$\frac{t_z l_i}{b_z l_0} B_{\delta нов} = \frac{t_z l_i}{b_z l_0} B_\delta,$$

откуда $B_{\delta нов} = B_{\delta стар}$.

Таким образом, величина B_δ в этом случае также не изменяется, а мощность уменьшается пропорционально уменьшению скорости вращения. Если зубцовый слой недогружен, то при уменьшении скорости вращения можно увеличить магнитную индукцию B_z, и в этом случае мощность уменьшится не пропорционально уменьшению скорости вращения. Из (5-36) определим B_δ:

$$B_{\delta нов} = \frac{b_z l_0}{t_z l_i} B_{z нов},\ тл. \qquad (5\text{-}65)$$

Задавшись предельной величиной B_z, по табл. 5-6 определим $B_{\delta нов}$. Зная величину $B_{\delta нов}$, легко определить остальные данные электродвигателя.

Пример. Требуется пересчитать асинхронный двигатель 20 *квт*; 220/380 *в*; 66/38,4 *а*; к. п. д. 90%; $\cos\varphi=0{,}88$ с короткозамкнутым ротором с числом полюсов $2p=4$ для работы при $2p=6$.

Данные двигателя: $D_н = 368$ *мм*; $D_в = 230$ *мм*; $l = 185$ *мм*; $z = 36$; $q = 3$; $w_{п.эл} = 72$; $a_1 = 3$; $a_2 = 2$; $d_м = 1{,}45$ *мм*; $d_{из} = 1{,}72$ *мм*; $y = 7$; $h_п = 30{,}8$ *мм*; $b'_п = 15$ *мм*; $b''_п = 10{,}3$ *мм*.

Определение расчетных величин на основании обмера

$$q_{пр} = \frac{\pi d_м^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 1{,}45^2}{4} = 1{,}651 \text{ мм}^2;$$

$$q_{эф} = q_п a_1 a_2 = 1{,}651 \cdot 3 \cdot 2 = 10 \text{ мм}^2;$$

$$w_{п.эф} = \frac{w_{п.эл}}{a_1 a_2} = \frac{72}{3 \cdot 2} = 12;$$

$$t_z = \frac{\pi D_в}{z} = \frac{3{,}14 \cdot 23}{36} = 2 \text{ см};$$

$$b_z = t_z - b''_п = 2 - 1{,}03 = 0{,}97 \text{ см};$$

$$h_а = \frac{1}{2}(D_н - D_в - 2h_z) = \frac{1}{2}(368 - 230 \cdot 2 \cdot 30{,}8) = 3{,}32 \text{ см};$$

$$l_i = l - \frac{1}{2} n_к b_к = 18{,}5 \text{ см};$$

$$l_0 = l_i k_{ж} = 18{,}5 \cdot 0{,}95 = 17{,}6 \text{ см}.$$

Определение магнитных и электрических нагрузок до перемотки:

$$B_\delta = \frac{2{,}7 \cdot 10^2 U p}{D_в l_i z w_{п.эф}} = \frac{2{,}7 \cdot 10^2 \cdot 220 \cdot 2}{23 \cdot 18{,}5 \cdot 36 \cdot 12} = 0{,}6700 \text{ тл};$$

$$B_а = \frac{D_б l_i}{2 p l_0 h_а} B_\delta = \frac{23 \cdot 18{,}5 \cdot 0{,}67}{4 \cdot 17{,}6 \cdot 3{,}32} = 1{,}215 \text{ тл};$$

$$B_z = \frac{t_z l_i}{b_z l_0} B_\delta = \frac{2 \cdot 18{,}5 \cdot 0{,}67}{0{,}97 \cdot 17{,}6} = 1{,}45 \text{ тл};$$

$$\Delta = \frac{I_ф}{q_{эф}} = \frac{38{,}4}{10} = 3{,}84 \text{ а/мм}^2;$$

$$AS = \frac{I_ф w_{п.эк}}{t_z} = \frac{38{,}4 \cdot 12}{2} = 230 \text{ а/мм};$$

$$\Delta AS = 3{,}84 \cdot 230 = 860.$$

Так как активные материалы недогружены, то при пересчете электродвигателя увеличим B_δ. В этом случае мощность его уменьшится не пропорционально уменьшению скорости вращения.

Задаемся величиной $B_z = 1{,}8$ *тл*, что вполне допустимо.

$$B_{\delta\text{нов}} = \frac{b_z l_0}{t_z l_i} B_{z\text{нов}} = \frac{0{,}97 \cdot 17{,}6 \cdot 1{,}8}{2 \cdot 18{,}5} = 0{,}83 \text{ } тл.$$

Определение магнитных и электрических нагрузок после пересчета:

$$B_a = \frac{D_в l_i}{2pl_0 h_к} B_\delta = \frac{23 \cdot 18{,}5}{6 \cdot 17{,}6 \cdot 3{,}32} \cdot 0{,}83 = 1{,}0 \text{ } тл;$$

$$w_{п.эф.нов} = w_{п.эф.стар} \frac{n_{стар}}{n_{нов}} \frac{B_{\delta стар}}{B_{\delta нов}} = 12 \frac{1\,500}{1\,000} \cdot \frac{0{,}67}{0{,}83} = 14{,}6 \cdot$$

Берем три параллельные ветви $a_2 = 3$.

$$w_{п.эл} = w_{п.эф} a_1 a_2 = 14{,}6 \cdot 1 \cdot 3 = 44;$$

$$q_{п.нов} = q_{п.стар} \frac{w_{п.стар}}{w_{п.нов}} = 1{,}651 \frac{72}{44} = 2{,}72 \text{ } мм^2;$$

$$d_{пр.нов} = \sqrt{\frac{4 q_{п.нов}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}72}{3{,}14}} = 1{,}87 \text{ } мм;$$

по каталогу берем 1,88 *мм*.

Мощность электродвигателя без учета изменения к. п. д. и $\cos\varphi$:

$$P_{2нов} = \frac{n_{нов}}{n_{стар}} \frac{B_{\delta нов}}{B_{\delta стар}} P_{2стар} = \frac{750}{1\,000} \cdot \frac{0{,}83}{0{,}67} \cdot 20 = 18{,}5 \text{ } квт.$$

Учитывая ухудшение охлаждения при переходе на меньшую скорость вращения, мощность электродвигателя следует уменьшить на 3—5%:

$$P_{2нов} = 0{,}97 \cdot 18{,}5 = 17{,}9 \text{ } квт.$$

Для двигателя мощностью 17,9 *квт* и $2p=6$ по табл. 5-11 находим к. п. д. $=0{,}88$ и $\cos\varphi = 0{,}82$.

Введя поправку на к. п. д. и $\cos\varphi$, окончательно получим величину мощности $P'_{2нов}$:

$$P'_{2нов} = P_{2нов} \frac{\cos\varphi_{нов}\eta_{нов}}{\cos\varphi_{стар}\eta_{стар}} = 15{,}4 \frac{0{,}82 \cdot 0{,}88}{0{,}84 \cdot 0{,}88} = 18 \text{ } квт \cdot$$

Ток в обмотке статора

$$I_{нов} = \frac{P'_2 \cdot 10^3}{3U_ф \eta_{нов} \cos\varphi_{нов}} = \frac{18 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0{,}83 \cdot 0{,}87} = 37{,}6 \text{ } а;$$

$$\Delta_{нов} = \frac{I_{ф.нов}}{q_{эф.нов}} = \frac{37{,}6}{2{,}72 \cdot 3} = 4{,}55 \text{ } а/мм^2;$$

$$AS_{нов} = \frac{I_{ф.нов} w_{п.эф.нов}}{t_z} = \frac{37{,}6 \cdot 14{,}6}{2} = 274 \text{ } а/см;$$

$$\Delta_{нов} AS_{нов} = 4{,}55 \cdot 274 = 1\,240.$$

5-7. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ

Модернизация электродвигателей выполняется с целью лучшего использования активных и конструктивных материалов.

При новых машинах это приводит к уменьшению объема и веса наединицу мощности В случае ремонта, когда геометрия машины уже задана, модернизация должна привести к повышению мощности или увеличению эксплуатационной надежности.

Мощность электродвигателя при прочих равных условиях пропорциональна величине максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре B_δ линейной нагрузке AS и силе тока I.

Так как остальные величины ($D_в$, l_i и др.) связаны с конструкцией электродвигателя, то увеличение мощности модернизируемого электродвигателя может произойти только за счет увеличения B_δ или силы тока. Но как было сказано ранее, увеличить B_δ по сравнению с заводской, как правило, нельзя, так как это приводит к значительному увеличению тока холостого хода. Поэтому увеличить мощность можно только за счет увеличения силы тока.

Последнее можно допустить в двух случаях: 1) применив более теплостойкую изоляцию, сохранив ее размеры; 2) увеличив сечение медных проводов. Увеличение сечения меди можно произвести за счет уменьшения толщины пазовой и витковой изоляции, сохранив при этом эксплуатационную надежность и электрическую прочность обмотки двигателя.

В настоящее время широко применяются изоляционные материалы на более тонкой основе, чем это имело место в конструкциях электрических машин прежних годов выпуска, причем без снижения их термостойкости, электрической и механической прочности. Например, эмальпровода и различные синтетические пленки.

Необходимо выяснить количественную зависимость между уменьшением толщины изоляции и возможностью при этом повышения мощности машины. Для этого следует установить, насколько может быть увеличен коэффициент заполнения паза в зависимости от уменьшения толщины изоляции.

Коэффициент заполнения паза медью (5-55) может быть представлен как произведение трех составляющих его коэффициентов:

$$K_м = K'K''K''', \qquad (5\text{-}66)$$

где K' — отношение площади сечения голого круглого провода к площади квадрата, описанного вокруг изолированного провода со стороной, равной $d_{из}$:

$$K' = \frac{q_м}{d_{из}^2} = \frac{\pi d_м^2}{4d_{из}^2} = \frac{\pi}{4}\left(\frac{d_м}{d_{из}}\right)^2; \qquad (5\text{-}67)$$

K'' — коэффициент заполнения изолированными проводами свободного пространства паза:

$$K'' = \frac{w_{п.эф} d_{из}^2}{Q'_п} = \frac{w_{п.эф} d_{из}^2}{Q_{п.св} - Q_{п.из} - Q_{кл}}, \qquad (5\text{-}68)$$

где $Q_{п.св}$ — сечение паза в свету, *мм*²;

$Q_{п.из}$, $Q_{кл}$ — площадь, занимаемая изоляцией паза и клином, *мм*².

Значение K'' для всыпных обмоток равно 0,7.

K''' учитывает, какую часть площади паза занимает пазовая изоляция и клин, он равен отношению площади свободного сечения $Q'_{п}$ ко всей площади паза в свету:

$$K''' = \frac{Q'_{п}}{Q_{п.св}}. \qquad (5\text{-}69)$$

Если обозначить индексом 1 данные, относящиеся к обмотке в старом исполнении, а индексом 2 — в новом исполнении, то

$$\frac{K_{м2}}{K_{м1}} = \frac{K'_2}{K'_1} \frac{K''_2}{K''_1} \frac{K'''_2}{K'''_1}. \qquad (5\text{-}70)$$

При толщине пазовой изоляции на сторону 0,6 *мм* величина коэффициента K''' составляет около 0,73, а при толщине изоляции 0,35 (на сторону) величина K''' увеличивается на 10% и составляет 0,8.

Ниже приводится табл. 5-12 значений K' для круглых проводов ПБД, ПЭЛБО и ПЭВ-2 с различными диаметрами изоляции, а также значение величины K'_2/K'_1, которая показывает изменение коэффициента K' при замене провода с хлопчатобумажной изоляцией на провод ПЭВ-2.

Таблица 5-12

Диаметр голого провода	K' для провода марки			$\frac{K'_2}{K'_1}$ для провода марки	
	ПБД	ПЭЛБО	ПЭВ-2	$\frac{ПЭВ\text{-}2}{ПБД}$	$\frac{ПЭВ\text{-}2}{ПЭЛБО}$
0,51	0,38	0,44	0,60	1,58	1,37
0,59	0,42	0,47	0,63	1,50	1,34
0,69	0,46	0,51	0,63	1,37	1,24
0,80	0,48	0,53	0,64	1,34	1,21
0,90	0,50	0,54	0,64	1,27	1,19
1,0	0,51	0,54	0,65	1,27	1,20
1,2	0,52	0,57	0,66	1,27	1,17
1,35	0,53	0,59	0,67	1,27	1,14
1,5	0,56	0,60	0,68	1,22	1,13
1,81	0,61	0,64	0,71	1,16	1,11
2,02	0,61	0,64	0,71	1,16	1,11

Таким образом, при переходе на более тонкую пазовую и витковую изоляцию можно значительно повысить коэффициент заполнения паза медью за счет повышения сечения проводников обмотки. Это даст возможность повысить мощность электродвигателя. Однако увеличить мощность электродвигателя пропорционально увеличению коэффициента $K_м$ нельзя, так как это ухудшает эксплуатационные показатели машины.

Необходимым условием сохранения эксплуатационных показателей является сохранение уровня потерь, а также отношения $M_{макс}/M_{ном}$ до и после модернизации. Для выполнения этих условий коэффициент увеличения мощности $K_р$ в зависимости от коэф-

фициента повышения заполнения паза медью β определяется по формуле

$$K_р = 0,7\beta + 0,3, \quad (5\text{-}71)$$

где $\beta = K_{м2}/K_{м1}$ — коэффициент повышения заполнения паза медью.

Из приведенной формулы видно, что каждый процент повышения заполнения паза медью дает возможность повысить мощность электродвигателя на 0,7%. Для сохранения отношения $M_{макс}/M_{ном}$ надо уменьшить число активных проводников в пазу в отношении

$$\frac{w_{п.эф2}}{w_{п.эф1}} \frac{1}{\sqrt{0,7\beta + 0,3}} \quad (5\text{-}72)$$

а сечение эффективного витка увеличить в соответствии с равенством

$$\frac{q_{2эф}}{q_{1эф}} = \beta \sqrt{0,7\beta + 0,3} \quad (5\text{-}73)$$

При этом плотность тока уменьшится в соответствии с равенством

$$\frac{\Delta_2}{\Delta_1} = \sqrt{\frac{0,7\beta + 0,3}{\beta}} \quad (5\text{-}74)$$

Линейная нагрузка увеличится:

$$\frac{AS_2}{AS_1} = \sqrt{0,7\beta + 0,3} \quad (5\text{-}75)$$

Индукция B_δ в зазоре изменится:

$$\frac{B_{\delta 2}}{B_{\delta 1}} = \sqrt{0,7\beta + 0,3} \quad (5\text{-}76)$$

Величина ΔAS изменится:

$$\frac{\Delta_2 AS_2}{\Delta_1 AS_1} = \frac{0,7\beta + 0,3}{\beta} \quad (5\text{-}77)$$

Эти соотношения приведены в табл. 5-13.

Пример. Определить, на сколько можно увеличить мощность ранее рассчитанного двигателя при применении более тонкой пазовой и витковой изоляции. Данные электродвигателя до модернизации: $P_2 = 23,1$ *квт*; $I_ф = 46,3$ *а*; $q_{эф} = 9,3$ *мм*²; $w_{п.эф} = 8,5$; $w_{п.эл} = 34$; $d_м = 1,73$; $\Delta AS = 1\,410$; $B_\delta = 0,66$ *тл*; $\Delta = 5$ *а/мм*². При модернизации применяем ПЭВ-2, а пазовую изоляцию выполнили из синтетической пленки.

$$\beta = \frac{K_{зап2}}{K_{зап1}} = \frac{K'_2}{K'_1} \frac{K''_2}{K''_1} \frac{K'''_2}{K'''_1} = 1,18 \cdot 1 \cdot 1,1 = 1,30$$

Пользуясь табл. 5-13, определим данные двигателя после модернизации:

$$P_{2ном2} = P_{2ном1} \cdot 1,21 = 23,1 \cdot 1,21 = 27,8 \text{ квт}$$

$$w_{п.эф2} = w_{п.эф1} \cdot 0,9 = 8,5 \cdot 0,91 = 7,75$$

$$q_{эф2} = q_{эф1} \cdot 1,43 = 9,3 \cdot 1,43 = 13,25 \ мм^2;$$

$$\Delta_2 = \Delta_1 \cdot 0,85 = 5 \cdot 0,85 = 4,25 \ а/мм^2;$$

$$AS_2 = AS_1 \cdot 1,1 = 282 \cdot 1,1 = 310 \ а/см;$$

$$\Delta_2 AS_2 = \Delta_1 AS_1 \cdot 0,93 = 1\,410 \cdot 0,93 = 1\,310;$$

$$B_{\delta 2} = B_{\delta 1} \cdot 1,1 = 0,66 \cdot 1,1 = 0,725 \ тл.$$

Таблица 5-13

Отношение						
$\frac{K_{м2}}{K_{м1}}$	$\frac{P_{2ном2}}{P_{2ном1}}$; $\frac{I_{ном2}}{I_{ном1}}$	$\frac{w_{п.\,эф2}}{w_{п.\,эф1}}$	$\frac{q_{эф2}}{q_{эф1}}$	$\frac{\Delta_2}{\Delta_1}$	$\frac{B_{\delta 2}}{B_{\delta 1}}$; $\frac{AS_2}{AS_1}$	$\frac{\Delta_2 AS_2}{\Delta_1 AS_1}$
Расчетная формула						
β	$0,7\beta+0,3$	$\frac{1}{\sqrt{0,7\beta+0,3}}$	$\beta\sqrt{0,7\beta+0,6}$	$\frac{\sqrt{0,7\beta+0,3}}{\beta}$	$\sqrt{0,7\beta+0,3}$	$\frac{0,7\beta+0,3}{\beta}$
1,1	1,07	0,97	1,14	0,94	1,035	0,97
1,15	1,105	0,955	1,21	0,915	1,05	0,96
1,2	1,14	0,94	1,28	0,890	1,07	0,95
1,25	1,175	0,925	1,36	0,875	1,085	0,94
1,3	1,21	0,91	1,43	0,85	1,10	0,93
1,35	1,245	0,90	1,50	0,825	1,115	0,922
1,4	1,28	0,88	1,58	0,805	1,13	0,915
1,45	1,315	0,87	1,66	0,790	1,145	0,90
1,5	1,35	0,86	1,74	0,775	1,16	0,9

5-8. ПЕРЕСЧЕТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ЗАМЕНЕ МАТЕРИАЛА ОБМОТОЧНОГО ПРОВОДА

В ремонтной практике бывают случаи, когда приходится производить замену обмоточных проводов: вместо алюминиевых применять медные или наоборот.

Удельное сопротивление алюминиевых проводов

$$\rho_{ал} = 0,0285 \frac{ом \cdot мм^2}{м}, \text{ а меди } \rho_м = 0,0175 \frac{ом \cdot мм^2}{м};$$

$$\frac{\rho_{ал}}{\rho_м} = \frac{0,0285}{0,0175} = 1,63.$$

Следовательно, удельное сопротивление алюминия в 1,63 раза больше, чем меди, поэтому замена медного провода алюминиевым того же сечения приведет к снижению мощности примерно на 60%. При переходе с меди на алюминий следует стремиться к сохранению мощности или по крайней мере к снижению ее не более чем на 20%.

Повышение величины максимальной магнитной индукции в воздушном зазоре до 10% в сочетании с применением более тонкой изоляции может привести к тому, что большое число случаев переходов на алюминиевые провода не приведет к существенному снижению мощности.

Пересчет электродвигателя при замене материала обмоточного провода производят по следующим формулам:

а) Расчет плотности тока, равноценной по нагреву для алюминиевых проводов:

$$\Delta_{\text{ал}} = \Delta_{\text{м}} \frac{\rho_{\text{м}}}{\rho_{\text{ал}}} = \Delta_{\text{м}} \cdot 0,615 \ a/\text{мм}^2. \qquad (5\text{-}78)$$

б) Сечение эффективного витка с учетом увеличения коэффициента заполнения паза при применении более тонкой изоляции и увеличения индукции:

$$q_{\text{ал}} = 1,05\, q_{\text{м}} \beta\gamma, \ \text{мм}^2, \qquad (5\text{-}79)$$

где 1,05 — величина, учитывающая увеличение коэффициента заполнения паза за счет меньшей жесткости алюминиевых проводов; γ — коэффициент, учитывающий увеличение B_δ.

в) Число проводов в пазу

$$w_{\text{п.эф.ал}} = w_{\text{п.эф.м}} \frac{B_{\delta\text{м}}}{B_{\delta\text{ал}}}.$$

г) Сила тока при переходе на алюминиевые провода

$$I_{\text{ал}} = 0,615\, \Delta_{\text{м}} \cdot 1,05\, q_{\text{м}}\gamma\beta = 0,645\, \Delta_{\text{м}} \cdot q_{\text{м}}\gamma\beta. \qquad (5\text{-}80)$$

д) Мощность двигателя

$$P_{2\text{ал}} = P_{2\text{м}} \cdot 0,645\gamma\beta.$$

Пример. Требуется пересчитать электродвигатель с короткозамкнутым ротором при замене медного провода алюминиевым. $P_2 = 9,6$ *квт*; U — 220/380 *в*; $I_{\text{ном}}$ — 34,3/19,8 *а*; скорость вращения 1 000 *об/мин.*

Данные электродвигателя: $D_{\text{в}} = 230$ *мм*; $l = 156$ *мм*; $z = 54$; $h_{\text{а}} = 21$ *мм*; $b_z = 5,2$ *мм*; $w_{\text{п.эл}} = 32$; $a_1 = 2$; $a_2 = 1$; $d_{\text{м}} = 1,74$ *мм*.

Определение расчетных величин на основании обмера:

$$t_z = \frac{\pi D_{\text{в}}}{z} = \frac{3,14 \cdot 230}{54} = 13,4 \ \text{мм};$$

$$l_i = l - 0,5\, n_s b_s = 156 \ \text{мм};$$

$$l_0 = l_i K_{\text{ж}} = 156 \cdot 0,95 = 148 \ \text{мм};$$

$$w_{\text{п.эф}} = \frac{w_{\text{п.эл}}}{a_1 a_2} = \frac{32}{1 \cdot 2} = 16.$$

Определение магнитных нагрузок:

$$B_\delta = \frac{2,7 \cdot 10^2\, Up}{D_{\text{в}} l_i z w_{\text{п.эф}}} = \frac{2,7 \cdot 220 \cdot 3 \cdot 10^2}{23 \cdot 15,6 \cdot 54 \cdot 16} = 0,585 \ \text{тл};$$

$$B_a = \frac{D_в l_i B_\delta}{2pl_0 h_a} = \frac{23 \cdot 15,6}{6 \cdot 2,1 \cdot 14,7} \cdot 0,585 = 1,13 \; тл;$$

$$B_z = \frac{t_z l_i}{b_z l_0} B_\delta = \frac{1,34 \cdot 15,6}{0,52 \cdot 14,7} \cdot 0,585 = 1,6 \; тл;$$

$$q_{эф} = 2\frac{\pi d_м^2}{4} = 2\frac{3,14 \cdot 1,74^2}{4} = 4,8 \; мм^2;$$

$$\Delta_{мед} = \frac{I_ф}{q_{эф}} = \frac{19,8}{4,8} = 4,12 \; а/мм^2;$$

$$AS_м = \frac{I_ф w_{п.эф}}{t_z} = \frac{19,8 \cdot 1,6}{1,34} = 237 \; а/см;$$

$$\Delta_м AS_м = 4,12 \cdot 237 = 975;$$

$$\beta = \frac{K'_2}{K'_1}\frac{K''_2}{K''_1}\frac{K'''_2}{K'''_1} = 1,18 \cdot 1 \cdot 1,1 = 1,3.$$

Так как активная сталь загружена недостаточно, то при переходе на алюминий увеличим B_δ на 15 %, тогда

$$P_{2ал} = 0,645 \, P_{2м} \gamma B = 0,645 \cdot 9,6 \cdot 1,3 \cdot 1,15 = 9,3 \; квт;$$

$$q_{эф.ал} = 1,05 \, q_{эф.м} \beta\gamma = 1,05 \cdot 4 \cdot 8 \cdot 1,3 \cdot 1,15 = 7,52 \; мм^2;$$

$$w_{п.эф.ал} = \frac{w_{п.эф.м}}{1,05 \, \gamma\beta} = \frac{16}{1,05 \cdot 1,3 \cdot 1,15} = 10,3;$$

$$w_{п.эл.ал} = w_{п.эф.ал} \cdot a_1 a_2 = 10,3 \cdot 1 \cdot 3 \approx 30.$$

5-9. ПЕРЕСЧЕТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ НА КОРОТКОЗАМКНУТЫЙ

До пересчета следует предварительно проверить, допускает ли соотношение числа пазов статора z и ротора $z_р$ проводить эту реконструкцию.

Во избежание прилипания ротора необходимо принять: а) $z \neq z_р$; б) $1/2 \; z \neq z_р$; в) $2z \neq z_р$; г) $z_р \neq 2p\,(3i + 1)$; д) $z_р \neq 2p \cdot 3i$, где i — любое целое число.

Во избежание застревания ротора при пуске необходимо принять: а) $z_р \neq z + p$; б) $z_р \neq z + 2p$; в) $z_р \neq 0,5z + p$; г) $z_р \neq 2z + 2p$.

Для предупреждения появления ненормального шума необходимо принять:

а) $z_р \neq 2p\,(3i \pm 1)$; б) $z_р \neq 3i \pm (2p + 1)$.

Расчет обмотки короткозамкнутого ротора. Короткозамкнутая обмотка ротора асинхронного двигателя, выполненная в виде беличьей клетки, представляет собой многофазную систему с числом фаз, равным числу пазов ротора $z_р$, причем в каждую фазу входит один стержень.

В каждой точке соединения стержня с кольцом на основании закона Кирхгофа можно установить следующее равенство (рис. 5-13,*а*):

$$I_{\text{ст}} = I_{\text{к}2-3} - I_{\text{к}1-2}, \tag{5-81}$$

где $I_{\text{ст}}$ — ток в стержне; $I_{\text{к}2-3}$ и $I_{\text{к}1-2}$ — ток в кольце на участке *2—3* и *1—2*.

Так как токи являются величинами векторными, то из равенства (5-81) следует, что ток стержня равен геометрической разности токов в двух примыкающих к узлу элементах кольца.

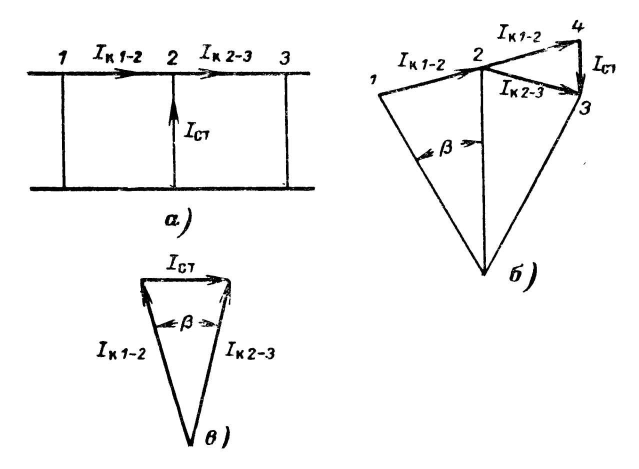


Рис. 5-13. Распределение токов в короткозамкнутом роторе.

а — направление токов в стержнях и короткозамыкающих кольцах; *б*, *в* — диаграмма токов в стержнях и на участке кольца.

Для графического определения разности двух векторов построим диаграмму, как показано на рис. 5-13,*б*, тогда вектор *4—3*, являющийся геометрической разностью векторов $I_{\text{к}2-3}$ и $I_{\text{к}1-2}$, и будет определять ток в стержне — $I_{\text{ст}}$.

Построенная таким образом диаграмма токов в увеличенном масштабе дана на рис. 5-13,*в*, из которой

$$I_{\text{к}} = \frac{I_{\text{ст}}}{2\sin\frac{\beta}{2}}, \tag{5-82}$$

где угол сдвига по фазе токов в соседних стержнях и частях кольца

$$\beta = \frac{2\pi p}{z_{\text{р}}},\ \textit{рад};$$

p — число пар полюсов; $z_{\text{р}}$ — число пазов ротора.

Сопротивление фазы беличьей клетки $r_{р.ф}$ с учетом приведения схемы токов к эквивалентной многофазной звезде определяется по следующей формуле:

$$r_{р.ф} = r_{ст} + \frac{2r_к}{\Delta_р^2}, \; ом, \tag{5-83}$$

где

$$\Delta_р = 2 \sin \frac{\pi p}{z_р}.$$

Ток стержня $I_{ст}$, равный номинальному току ротора, определяется по следующей формуле:

$$I_{ст} = I_{р.н} = K_1 I_ф \frac{6w_{эф}k_\omega}{z_р}, \; а, \tag{5-84}$$

где $I_ф$ — номинальный фазный ток обмотки статора, $а$; k_ω — обмоточный коэффициент обмотки статора, равный 0,91—0,93; K_1 — коэффициент, зависящий от $\cos \varphi$ двигателя, равен 0,8—0,95 (меньшее значение берется для двигателей с меньшим $\cos \varphi$).

Сечение стержня — $q_{ст}$ и короткозамыкающего кольца — $q_к$:

$$q_{ст} = \frac{I_{ст}}{\Delta_{ас}}, \; мм^2$$

где $\Delta_{ас}$ — плотность тока в стержне 5,5—8 $а/мм^2$, зависит от степени охлаждения и необходимого пускового момента;

$$q_к = \frac{I_к}{\Delta_к}, \; мм^2$$

где $\Delta_к$ — плотность тока в кольце — $(0{,}65—0{,}8)\Delta_{ас}$, $а/мм^2$.

Сопротивление стержня и соответствующего участка короткозамыкающего кольца:

$$r_{ст} = 1{,}24\,\rho \frac{l'_{ст} \cdot 10^{-2}}{q_{ст}}, \; ом \tag{5-85}$$

$$r_к = 1{,}24\rho \frac{\pi D_к \cdot 10^{-2}}{z_р a_\delta}, \; ом \tag{5-86}$$

где $l'_{ст}$ — длина стержня (до центров короткозамыкающих колец), *см*; ρ — удельное сопротивление материалов стержня и кольца при температуре 15° С; $D_к$ — средний диаметр короткозамыкающего кольца, *см*; *а, б* — размеры сечения кольца, *мм*.

Глава шестая

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА РЕМОНТНЫХ РАБОТ

6-1. ВЫБОР ТИПА ОБМОТКИ ПРИ РЕМОНТЕ

При ремонте электродвигателей, как правило, сохраняют тип обмотки. В некоторых случаях он может быть изменен.

Выбор типа обмотки зависит от конструкции паза статора, мощности номинального напряжения и скорости вращения. В случае изменения конструкции обмотки руководствуются следующими соображениями:

1. Для статоров асинхронных двигателей мощностью до 10 *квт,* напряжением до 500 *в* с полузакрытым пазом рекомендуется применять всыпную однослойную цепную обмотку из мягких катушек. Она дает несколько лучшее заполнение паза, так как отсутствует межслойная прокладка и требуется катушек в 2 раза меньше, чем для двухслойной обмотки. Следует учесть, что цепная обмотка может быть выполнена при четном числе пазов статора и с ограниченной возможностью по укорочению шага. При нечетном числе пазов следует выполнять двухслойную обмотку.

2. Для статоров асинхронных двигателей от 10 до 100 *квт,* напряжением до 500 *в* с полузакрытым пазом рекомендуется выполнять двухслойную обмотку из мягких катушек. В этом случае прокладка занимает относительно мало места и, кроме того, получается удобная укладка лобовых частей, имеющих меньшие вылеты по сравнению с однослойной цепной обмоткой.

3. Для двигателей мощностью от 100 до 250 *квт,* напряжением до 500 *в* с полуоткрытым пазом рекомендуется выполнять обмотку с жесткими катушками из прямоугольного провода, разделенными на две полукатушки.

4. Двигатели до 500 *в* с закрытым пазом выполняются с однослойной катушечной обмоткой «впротаску».

5. Обмотки двигателей свыше 500 *в* с открытым пазом мощностью от 100 *квт* и выше, как правило, выполняются двухслойными. Исключением могут являться двухполюсные машины, где лучше (с точки зрения заполнения пазов) применять однослойную обмотку «вразвалку» или цепную обмотку.

6. Двигатели свыше 500 *в* с закрытым пазом в отличие от низковольтных имеют большее количество витков в пазу. Это затрудняет намотку и обеспечение витковой изоляции, ибо при многократном протаскивании витков через паз изоляция нарушается. При полной перемотке таких двигателей рекомендуется применять разрезную обмотку.

6-2. ИЗГОТОВЛЕНИЕ И УКЛАДКА КАТУШЕК ВСЫПНЫХ ОБМОТОК ИЗ КРУГЛОГО ПРОВОДА ДЛЯ МАШИН НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 500 *в*

Намотку катушек всыпных обмоток производят на станках на специальных шаблонах, имеющих несколько ячеек, благодаря чему можно мотать катушечную группу без паек между отдельными катушками. Число ячеек выбирается равным или кратным числу катушек в катушечной группе.

Размеры катушек обычно определяют по заводскому исполнению. Если в ходе ремонта нужно изменить шаг обмотки или отсутствует старая обмотка, то для мягких катушек важнее всего определить среднюю длину витка $l_{ср}$, которую определяют с помощью пробного витка.

Изготовив виток из проволоки, опускают его в пазы согласно шагу обмотки. Виток примеряют с учетом глубины крышек и расположения сторон в разных слоях. При достаточном навыке обмотчик безошибочно, опытным путем, определяет среднюю длину витка.

Ее также можно определить расчетным путем:

$$l_{ср} = \frac{K\,(D_в + h_п)\,y}{z} + 2l + 60 \text{ мм}, \qquad (6\text{-}1)$$

где K зависит от числа полюсов и имеет следующие значения:

Число полюсов	2	4	6	8 и более
K	8,2	8,5	9,1	9,8

Изготовление катушек производится с помощью намоточного приспособления. На рис. 6-1 дана конструкция намоточного приспособления с ручным приводом для намотки мягких катушек. Изменение размеров катушек достигается перемещением шаблона *1* по коромыслу *3*. Приспособление снабжено счетчиком оборотов *7*.

Наиболее производительным и совершенным является шарнирный шаблон (рис. 6-2), обеспечивающий бы-

строе снятие катушек. Работа на нем производится следующим образом.

Выводной конец катушечной группы закрепляют за оправку *1*, затем наматывают первую катушку, подкладывая шпагат для связывания витков. Далее, пропуская провод через прорези, наматывают остальные катушки.

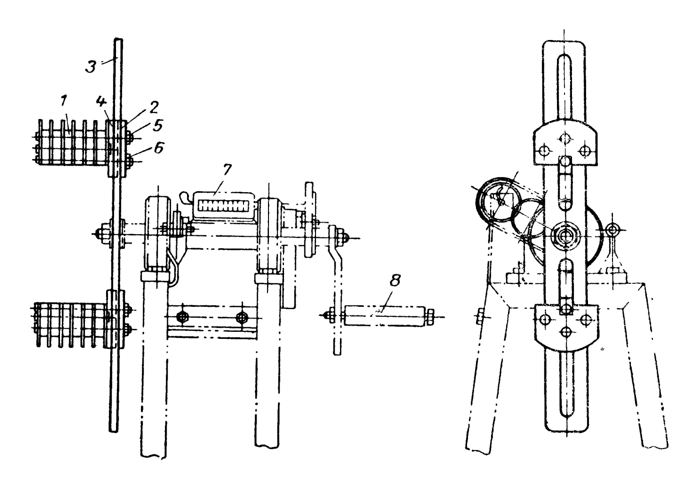


Рис. 6-1. Намоточное приспособление с ручным приводом.

1 — колодка шаблона; *2* — планка; *3* — коромысло; *4* — ползуны; *5* — шпилька; *6* — гайка; *7* — счетчик оборотов; *8* — ручка.

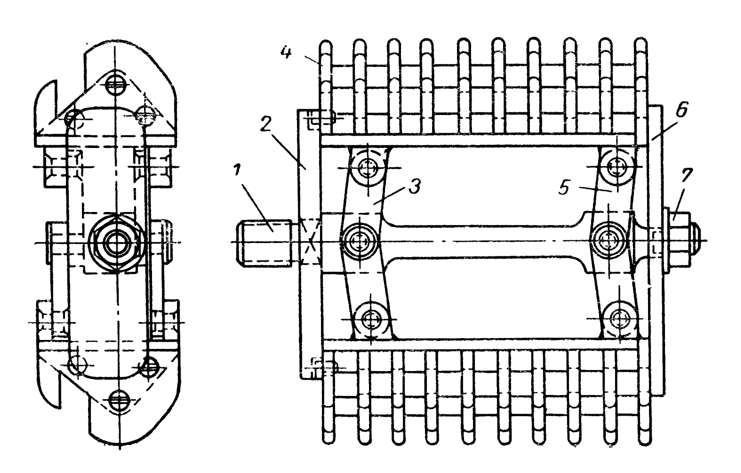


Рис. 6-2. Шарнирный намоточный шаблон.

После намотки всей катушечной группы намотчица отвинчивает гайку *7* на одну-две нитки резьбы и снимает планку *6* при повороте планок *3* и *5* вокруг осей *2*. Головки *4* сходятся к центру, освобождая намотанные катушки.

В электродвигателях старых выпусков, а также электродвигателях единой серии малой мощности применяются однослойные концентрические обмотки.

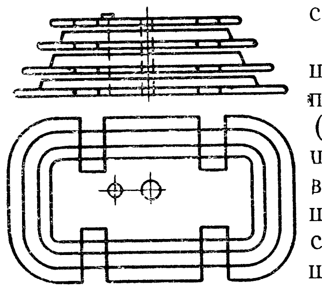


Рис. 6-3. Ступенчатый шаблон.

Для намотки целиком катушечной группы таких обмоток используют ступенчатый шаблон (рис. 6-3). Число ступеней этого шаблона равно числу катушек в катушечной группе. На этом шаблоне можно мотать обмотки с двойным и чередующимся шагом.

Укладка обмоток является одной из наиболее ответственных операций технологического процесса ремонта. Перед укладкой пазы статора прочищаются сжатым воздухом, так как в них могут оказаться заусенцы, а также металлические опилки. Нажимные шайбы статора изолируют несколькими полосками электрокартона, чтобы они доходили до дна паза и служили опорой для выступающих концов гильз. Электрокартон предохраняет концы гильз от разрыва при отгибании лобовых частей обмотки.

Для тех же целей при огильзовке пазов концы гильзовых коробочек усиливаются манжетами. Применение их особо желательно в тех случаях, когда нет опорных изоляционных колец или нельзя изолировать нажимные шайбы. Заготовку электрокартона производят таким образом, чтобы направление волокон уложенной в паз коробочки совпадало с продольной осью электродвигателя, это предохраняет его от трещин и разрывов при опрессовке.

Существуют два способа укладки двухслойных обмоток: с поднятым шагом и с замком. При укладке обмотки с поднятым шагом укладывают вначале шаговые катушки. Число их равно шагу обмотки. Вначале укладывают стороны катушек, которые лежат на дне паза,

Верхние стороны этих катушек временно могут оставаться невложенными или могут быть вложены в пазы, чтобы не мешали укладке остальных катушек. Затем укладываются остальные катушки верхними и нижними сторонами. Перед укладкой катушек последнего шага вторые стороны первого шага поднимаются для того, чтобы уложить стороны катушек последнего шага на дно паза. После этого поднятые стороны катушек первого шага опускаются.

При замене обмотки машин с малым диаметром расточки статора укладка обмотки с поднятым шагом затруднительна. В этом случае более рациональным является способ укладки с замком, при котором катушки первого шага укладываются обоими сторонами на дно паза, а все остальные катушки, кроме катушек последнего шага, укладываются, как обычно, в двухслойной обмотке. Оставшиеся катушки последнего шага укладываются обоими сторонами вверху паза.

В каждом случае нужно решить, какой из указанных способов укладки обмотки является предпочтительным, учитывая, что при первом способе обмотка имеет более правильный и аккуратный вид, так как все начала катушечных групп расположены в первом слое, а концы во втором.

Катушки двухслойных обмоток укладываются в пазы катушечными группами. Во избежание перекрещивания проводников в пазу укладку их нужно производить в том же порядке, в котором эти проводники наматывались на шаблоне, а также располагались бы параллельно друг другу.

Между верхними и нижними сторонами катушек в пазах закладываются межслойные прокладки из электрокартона толщиной 0,3 *мм,* а в лобовой части между группами, принадлежащими разным фазам, ставят прокладки по форме лобовых частей с припуском 5 *мм* из электрокартона, оклеенного лакотканью. В процессе укладки обмотки должен производиться отгиб лобовых частей к наружному диаметру стали статора.

Для проверки симметричности отгиба по окружности статора рекомендуется пользоваться специальным шаблоном. Перед заклиновкой производят уплотнение проводов в пазу с помощью подбойки. Толщина пазового клина должна обеспечивать достаточно плотное закрепление проводов в пазу.

6-3. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЖЕСТКИХ КАТУШЕК ДВУХСЛОЙНЫХ ОБМОТОК ИЗ МЕДИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

Намотка катушек из прямоугольной меди несколько сложнее, чем из круглого провода, так как при этом необходимо обеспечить с большой точностью заданную конструктивную форму катушек и их размеры.

Изготовление обмотки производят на шаблоне, называемом в практике «лодочкой» (рис. 6-4).

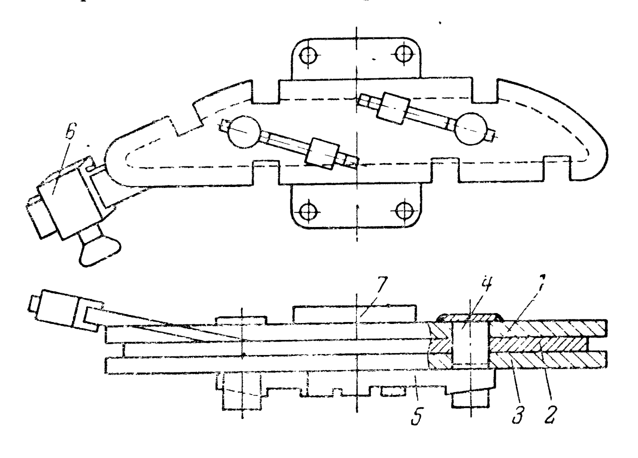


Рис. 6-4. Шаблон-лодочка для намотки катушек двухслойных обмоток.

1 — фланец; 2 — шаблон; 3 — запорный фланец; 4 — ось; 5 — запорная шайба; 6 — место крепления выводного конца; 7 — фланец крепления шаблона.

Размеры шаблона рассчитываются в соответствии с размерами катушек. Ширина шаблона берется с учетом размеров обмоточного провода с изоляцией. При ремонте размеры шаблона проще всего определить по размерам старой катушки, для чего при выемке старой обмотки стараются сохранить без искажения размеров и конфигурации четыре-пять катушек; по ним и изготавливают шаблон-лодочку для новой обмотки, предварительно выправив их и отрихтовав по форме «лодочки».

В тех случаях, когда старые катушки не сохранились, а также при изменении шага обмотки размеры шаблона определяются расчетным путем (рис. 6-5) [Л. 9].

Длина прямолинейной части секции равна:

$$l + 2C, \tag{6-2}$$

где l — длина активной стали статора, *см*; C берут по табл. 6-1.

Расстояние между пазовыми частями секции

$$A_1 + A_2 = \frac{\pi (R_1 + R_2) y}{z}. \tag{6-3}$$

Угол наклона лобовых частей

$$\sin \alpha = \frac{b + s}{t}, \tag{6-4}$$

где b — ширина секции в лобовой части с учетом разбухания; t — пазовое деление; s — наименьший (в верхней части плоскости обмот-

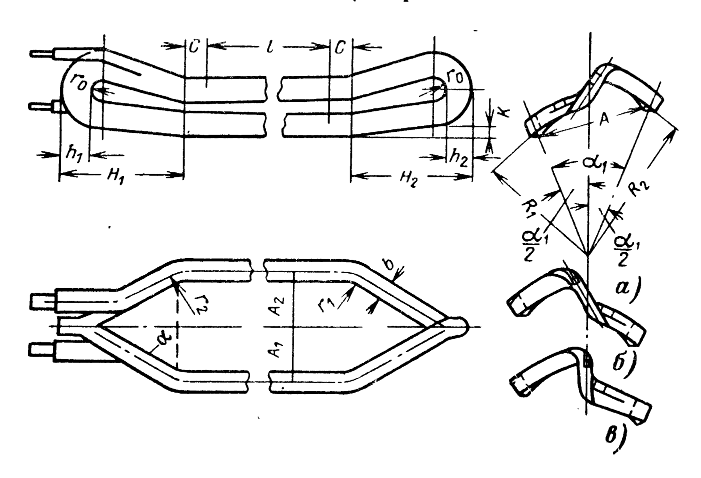


Рис. 6-5. Основные размеры катушек двухслойной обмотки.
а, б — варианты растяжки; *в* — прямая головка.

ки) зазор между лобовыми частями смежных изолированных секций после укладки в паз (берут по табл. 6-1).

Таблица 6-1

Номинальное напряжение машины, *в*	C, *мм*	Зазор S, *мм*, при высоте секции		r_0, *мм*
		до 50 *м*	свыше 50 *мм*	
До 500	20—25	4,5	4,5	6
3 000	35—40	4,5	4,5	12
6 000	50—55	4,5	6,5	15

Вылеты лобовых частей:

$$H_1 = \left[r_2 \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) + \frac{A_1 + A_2}{2} \right] \operatorname{tg} \alpha + h_1, \; мм; \qquad (6\text{-}5)$$

$$H_2 = \left[r_2 \left(\frac{1}{\sin \alpha} - 1 \right) + \frac{A_1 + A_2}{2} \right] \operatorname{tg} \alpha + h_2, \; мм; \qquad (6\text{-}6)$$

$$r_2 = r_1 + \frac{b}{2}, \; мм, \qquad (6\text{-}7)$$

где r_1 — радиус закругления по меди, выбирают в пределах 25—50 *мм* в зависимости от конструкции изоляции катушки.

Внутренний радиус головки r_0 выбирают по табл. 6-2. Отгиб лобовой части делается на угол $\beta = 6—8°$. Радиальный отгиб лобовых частей

$$K = (H_2 - h_2 - r_0) \operatorname{tg} \beta. \qquad (6\text{-}8)$$

Размер A (рис. 6-2), по которому устанавливается станок для растяжки катушек, определяется следующим образом:

$$A = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 + 2R_1R_2 \cos(\alpha_1 - 2\gamma)}, \qquad (6\text{-}9)$$

где

$$\alpha_1 = \frac{360°}{z} y; \; \sin \gamma = \frac{b_0}{2R_1};$$

b_0 — толщина катушки без изоляции.

Наиболее просто изготавливаются катушки для машин с напряжением до 550 *в* с изоляцией класса *А* без дополнительной витковой изоляции.

Катушки двухслойной обмотки в процессе изготовления проходят следующие операции: 1) намотку; 2) пропитку; 3) растяжку; 4) рихтовку лобовой и пазовой частей на макете; 5) опрессовку прямолинейной части; 6) изолировку.

В крупных синхронных и асинхронных машинах свыше 500 *в* старых выпусков применялась гильзовая изоляция обмоток статора. В настоящее время на электромашиностроительных заводах гильзовую изоляцию почти полностью вытеснила непрерывная компаундированная изоляция. Однако изготовить обмотку с компаундированной изоляцией в условиях ремонтной мастерской не представляется возможным, так как в этом случае требуется специальное оборудование. Поэтому такие обмотки заказываются на специализированных предприятиях, а укладку их производят на месте установки машины. На промышленных предприятиях и электростанциях эксплуатируется очень большое количество электродвигателей и генераторов старых выпусков, имеющих гильзовую изоляцию обмоток. При ремонте перевод их на

компаундированную, как правило, не представляется возможным, так как толщина пазовой изоляции компаундированной обмотки должна быть на 25—30% больше, чем в гильзовом исполнении. Кроме того, при ремонте машин свыше 500 *в* с компаундированной изоляцией иностранных марок, где толщина пазовой изоляции, как правило, меньше, чем допускаемая союзными нормами, часто приходится переходить на гильзовую изоляцию, обеспечивающую в этих случаях большую эксплуатационную надежность.

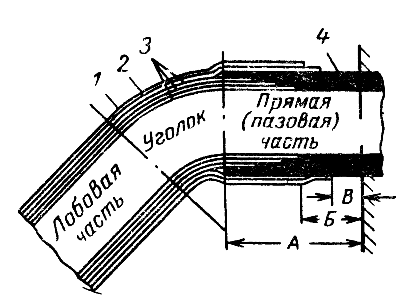


Рис. 6-6. Сопряжение пазовой и лобовой частей по способу обратного конуса.

1 — хлопчатобумажная или стеклянная лента; *2* — лакотканевая лента; *3* — микалента; *4* — микафолиевая гильза.

Изоляция гильзовых катушек в пазовой части представляет собой запечную гильзу из микафолия, слюдинитофолия или формовочного миканита. Общая изоляция в лобовых частях выполняется из нескольких слоев микаленты и лакоткани. Поверх общей изоляции на лобовую часть накладывается защитный слой киперной, стеклянной или асбестовой ленты. Толщина гильзы, а также число слоев микаленты и лакоткани в лобовой части зависят от номинального напряжения машины.

Одним из недостатков гильзовой изоляции является наличие стыка между пазовой и лобовой частью изоляции, который является крайне уязвимым местом, так как находится вблизи от активной стали статора. Поэтому данному узлу изоляции придается особое значение и от качества исполнения его зависит надежность всей изоляции. Существуют два способа сопряжения прямолинейной и лобовой частей: с «прямым» и «обратным» конусом.

По первому способу конец гильзы срезается на конус, а затем производится наложение слоев микаленты и лакоткани уступами. По второму способу вначале накладывается уступами несколько слоев микаленты на уголки с заходом в прямолинейную часть, а затем накладывается гильза (рис. 6-6).

При одинаковом расстоянии концов гильзы от активной стали путь электрического разряда при обратном конусе в 1,5 раза длинее, чем при прямом. Поэтому в целях увеличения эксплуатационной надежности сопряжение пазовой изоляции с лобовой следует выполнять способом обратного конуса.

Технология изготовления высоковольтных катушек двухслойной обмотки с гильзовой изоляцией состоит из следующих операций.

Намотка лодочки производится на намоточных станках. Для обеспечения правильной формы и компактности лодочки провод при ее изготовлении должен все время находиться в натянутом состоянии, для чего он предварительно наматывается правильными рядами на барабан с тормозным устройством. Для предотвращения скручивания провод проходит через «глазок», представляющий собой текстолитовую пластину толщиной 10—15 *мм,* в которой точно по размеру провода вырезано отверстие (устанавливается между барабаном и шаблоном).

При намотке провода на шаблон каждый виток его подбивается по форме шаблона, чем достигается плотность всей лодочки.

Если по конструктивному исполнению катушки предусмотрена дополнительная изоляция провода микалентой, то эта операция производится в процессе намотки лодочки. Часто эта дополнительная изоляция предусматривается только в лобовых частях.

Дополнительная изоляция может предусматриваться также в виде миканитовых прокладок. Во избежание повреждения этих прокладок при дальнейших операциях при намотке лодочки вместо них закладываются временные прокладки из электрокартона такой же толщины.

В процессе намотки необходимо следить за целостностью проводниковой и дополнительной микалентной изоляции, а также за правильностью перекроя микалентной изоляции.

При намотке лодочки выводные концы предусматриваются с припусками, выступающими за ее контур на 120—150 *мм.*

После проверки качества намотки и размеров лодочка плотно связывается в нескольких местах лентой или шпагатом, выводные концы очищаются от изоляции, и лодочка снимается с шаблона. Затем лодочка банда-

жируется стеклянной или хлопчатобумажной лентой по всему контуру. Лента накладывается в лобовой части в один слой вполнахлеста, а в пазовой части — вразбежку.

В процессе бандажировки лодочка сжимается по высоте струбцинами, а по ходу бандажировки с нее снимаются завязки, которыми она была скреплена перед снятием с шаблона.

Растяжка лодочки. При помощи этой операции лодочке придается форма, близкая к окончательной форме катушки.

Следует выбрать один из двух вариантов направления растяжки, приведенных на рис. 6-5,*а, б*.

При изготовлении всего комплекта катушек вариант растяжки безразличен, но все же предпочтительней выполнить его по заводскому исполнению, чтобы использовать без каких-либо переделок основные детали выводов и внутримашинных соединений.

Исходя из указанных соображений, следует выбрать и форму головки (петли) катушки. Они могут быть растянутыми (рис. 6-5,*б* и *в*), когда ось головки расположена под некоторым углом к вертикальной оси катушки, или прямыми — при совпадении осей головки и катушки.

Растяжка лодочек производится на специальном станке (рис. 6-7).

Лодочка, заложенная в станок, растягивается вращением плеча *6* вокруг своей оси. При растяжке головкодержатели *4* сближаются.

Передвижные стопорные кольца *7* закрепляются таким образом, чтобы ограничить движение головкодержателей 4 тогда, когда размеры $A_к$ и α_1 растянутой лодочки достигнут требуемых величин.

После растяжки катушка снимается со станка, проверяется целость изоляции и отсутствие смещенных витков.

При отсутствии растяжного станка можно лодочку растягивать ручным способом [Л. 11].

Для придания лобовым частям нужной кривизны и отгиба в радиальном направлении производят рихтовку катушек на специальном шаблоне (рис. 6-8), обеспечивающую окончательную форму катушки.

После рихтовки с катушек снимается стягивающая ее временная лента и все временные прокладки между

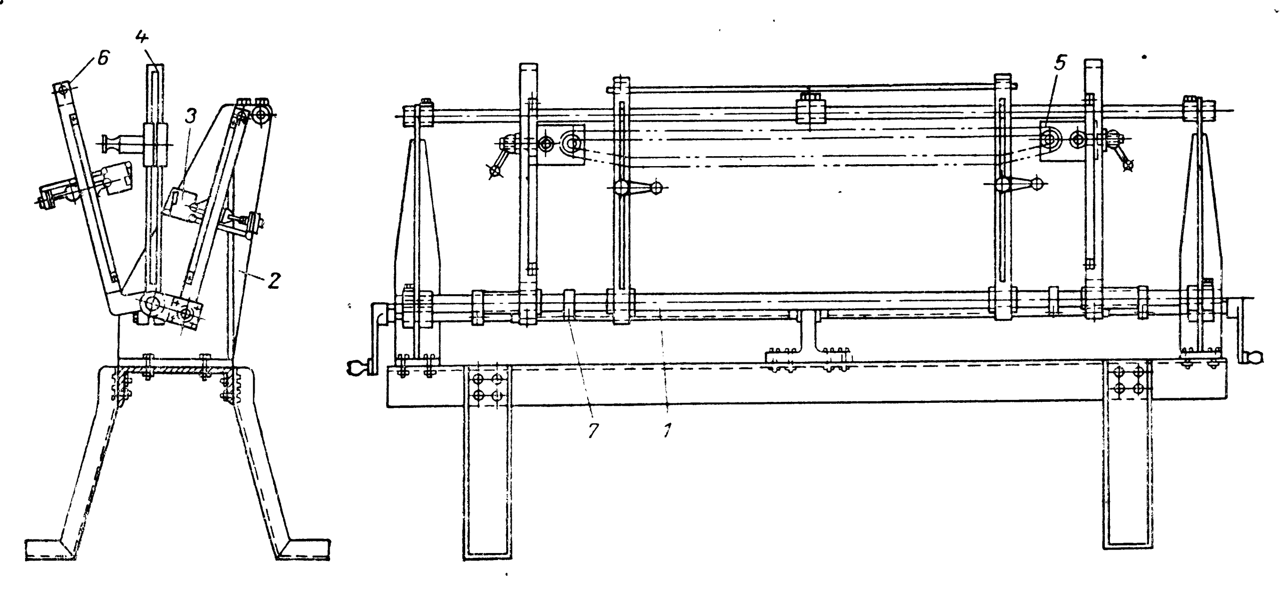


Рис. 6-7. Растяжной станок.

1 — вал; *2* — стойка; *3* — пазовые зажимы; *4* — головкодержатель; *5* — головка станка; *6* — поворотное плечо; *7* — стопорное кольцо.

витками заменяются постоянными. Эти прокладки должны быть шире провода и выступать на 0,3—0,5 *мм* с каждой стороны.

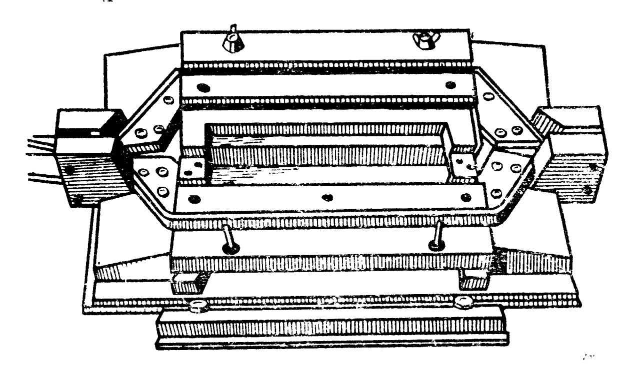


Рис. 6-8. Рихтовочный шаблон.

Сушка и пропитка изолированных катушек. Сушке и пропитке должны подвергаться катушки независимо от марки провода и электроизоляционных материалов.

Перед пропиткой катушки предварительно просушиваются в печи при температуре 105—110° С в течение 4—8 *ч* (в зависимости от их размеров).

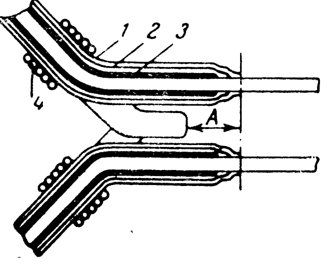


Рис. 6-9. Изоляция выводных концов катушки.

1 — хлопчатобумажная или стеклянная лента; 2 — лакотканевая лента; 3 — микалента; 4 — шпагатный бандаж.

Пропитка в лаке производится путем погружения катушек, нагретых до температуры 60° С, на 15—20 *мин* в ванну с лаком.

По окончании пропитки, признаком чего служит прекращение выделения пузырьков воздуха из лака, катушки вынимаются из ванны и подвешиваются над ней за головки для стекания лака. Через 15—20 *мин* катушки перевешивают за противоположную головку и снова выдерживают 15—20 *мин*.

Пропитанные катушки сушат в печи при температуре 105—110° С в течение 8—10 *ч*.

Изолировка выводных концов. Исполнение изоляции выводных концов приведено на рис. 6-9 и в табл. 6-2.

Изоляция выводного конца начинается с середины плеча лобовой части и доводится до луженых участков выводных концов. Располагается изоляция уступами со сдвигом слоев между собой в 10—15 *мм*. Поверх слоев

Таблица 6-2

Рабочее напряжение, *в*	Расстояние *А*, *мм*	Число слоев изоляции		
		Микалента	Лакотканевая лента	Хлопчатобумажная или стеклянная лента
650	10	—	1	1
3 150	10	—	2	1
6 300	15	2	2	1

микаленты и лакоткани накладывается защитный слой тафтяной ленты или стеклоленты (в один слой вполнахлеста), пропитанной лаком 447. Изолированные выводные концы в местах их отгиба закрепляются бандажом из 10—12 витков шпагата диаметром 1,5—2,0 *мм*.

Опрессовка неизолированных секций. Опрессовка прямолинейной части неизолированных катушек (опрессовка столбиков) производится в нагретом состоянии и имеет целью уплотнить между собой отдельные провода и изоляцию, а также придать столбику монолитность и обеспечить требуемые его размеры.

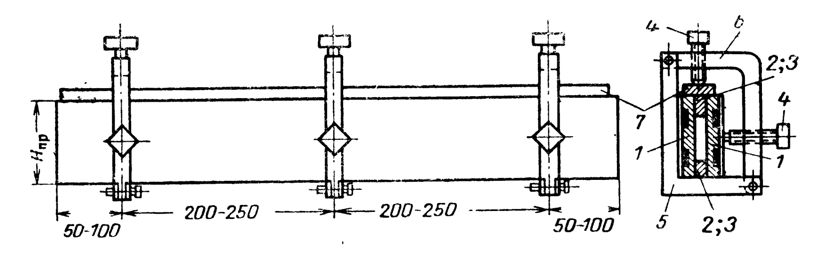
Приспособлением для опрессовки и запечки являются пресс-формы. На рис. 6-10 приведена конструкция и даны размеры пресс-формы с электрическим подогревом и воздушным охлаждением, получившей наибольшее распространение в ремонтной практике при небольшом количестве изготовляемых катушек.

Опрессовка и выпечка столбика, а также микафолиевой гильзы производятся в пространстве, ограниченном двумя боковыми планками *1* и двумя вкладышами *2* и *3*. Вкладыши *2* предназначены для опрессовки столбика, а вкладыши *3* — для опрессовки и выпечки гильзы.

Создание необходимого давления (25—35 *кГ/см*²) обеспечивается завертыванием болтов *4* струбцин. Струбцины, изготовляемые обычно из стали размером 50×50 или 60×60 *мм* и снабженные болтами М36, располагаются через 200—250 *мм* по длине пресс-формы. Каждая струбцина состоит из двух угольников. Один из них —

неподвижный 5 — закрепляется на швеллере, другой — угольник 6 — съемный.

После опрессовки столбиков производят изолировку уголков. Слои изоляции уголков накладываются в направлении от лобовой части к прямолинейной. Это уменьшает затекание лака в изоляцию уголков при вы-



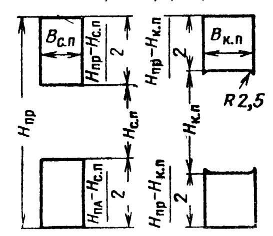


Рис. 6-10. Пресс-форма с электроподогревом.

печке гильз. Изоляция располагается уступами со сдвигом слоев между собой в 10—15 *мм*. Общая длина конуса уголка около 40—45 *мм* при рабочем напряжении 6 *кв* и 25—30 *мм* для 3 *кв*. Выполнение изоляции уголков приведено на рис. 6-6 и в табл. 6-3.

Таблица 6-3

Рабочее напряжение, *в*	Размеры, *мм*			Число слоев		
	А	*Б*	*В*	Микалента	Лакотканевая лента	Хлопчатобумажная или стеклолента
550	20	10	10	1	1	1
3 150	40	15	10	3	1	1
6 300	65	25	15	5	2	1

Накатка, опрессовка и выпечка пазовых гильз. При предварительных расчетах числа слоев микафолия усад-

ку его при опрессовке и выпечке принимают равной 25% от толщины гильзы. Число слоев

$$n_м = 1,25 \frac{\Delta_г}{\delta_1},$$

где $\Delta_г$ — толщина гильзы, *мм;* δ_1 — толщина микафолия, *мм*; 1,25 — поправочный коэффициент на усадку при опрессовке.

Окончательно число слоев определяется по опытным образцам.

Во избежание утолщения концов гильз для катушек, у которых сопряжение пазовой и лобовой частей выполняется обратным конусом, форма заготовок должна быть выполнена так, как показано на рис. 6-11, где показаны следующие размеры:

L_1 — длина гильзы, *мм*; L_2 — расстояние между концами первого внутреннего слоя микаленты изоляции уголков, *мм*; l_1 — длина конуса, *мм*, равная $\frac{L_1 - L_2}{2}$; B — ширина заготовок, *мм*;

$$B = 2,5 (H_{сп} + B_{сп} + 2\Delta_г) \frac{\Delta_г}{\delta_1},$$

где $H_{сп}$ и $B_{сп}$ — размеры неизолированной катушки по высоте и ширине, *мм*; h — высота конуса, *мм*:

$$h = 4n_г \frac{\delta_2}{\delta_1} (H_{сп} + B_{сп} + 2\Delta_г), \textit{ мм},$$

где $n_г$ — число слоев микаленты под гильзой; δ_2 — толщина микаленты, *мм*.

Перед накаткой для придания микафолию необходимой гибкости его нагревают до температуры 70—80° С. После наложения всех слоев обкатывают микафолий на специальном обкаточном станке в течение 20—30 *мин*. При отсутствии станка обкатка может быть произведена вручную. В этом случае обмотчики плотно прижимают столбик катушки к металлическому столу, нагретому до 90—100° С. Поверх микафолия гильза обер-

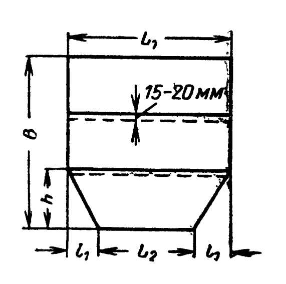


Рис. 6-11. Заготовка для гильз.

тывается двумя слоями электрокартона толщиной 0,1 *мм* или кабельной бумагой. После этого катушка поступает на опрессовку и выпечку.

Для этой цели ее укладывают в пресс-форму (рис. 6-10), затягиваются болты *4* струбцин, и пресс-форма разогревается до 110—120° С при шеллачном и до 140—150° С при глифталиевом микафолии.

В процессе разогрева производится постепенная затяжка болтов струбцин. Затяжку болтов начинают от середины и продолжают в обе стороны к концам пресс-формы.

При достижении указанных выше температур болты окончательно подтягиваются до такой степени, когда верхняя нажимная планка *7* вплотную ляжет на боковые планки *1*, а последние будут плотно прижаты к внутренним вкладышам *3*.

После окончательной затяжки болтов температура подогрева пресс-планок увеличивается до 140—150° С при шеллачном и до 170—180° С при глифталевом микафолии. При указанной температуре изоляция выпекается в течение 30—60 *мин*. Точное время, необходимое для выпечки, устанавливается на опытных образцах отдельно для каждой партии микафолия. При отработке режима выпечки может быть изменена также и температура выпечки. При выпечке опытных образцов проверяется и корректируется число слоев микафолия, необходимых для получения гильзы требуемой плотности.

Одним из признаков окончания выпечки изоляции является прекращение выделения лака с торцов гильзы. По окончании выпечки нагреватели отключаются от сети и пресс-форма охлаждается. Для ускорения охлаждения пресс-формы рекомендуется обдувать ее вентилятором или сжатым воздухом. При изготовлении сравнительно большой партии катушек рекомендуется применять пресс-формы с водяным охлаждением. Для этой цели в боковых планках прострагивают специальные каналы для протока воды. Процесс охлаждения водой в 3—4 раза интенсивнее, чем обдувом.

При охлаждении пресс-формы до 30—35° С катушка вынимается из пресс-формы, гильза очищается от наплывов лака, и проверяются ее размеры по высоте и ширине с помощью штангенциркуля или предельными шаблонами. Выпеченная гильза должна быть достаточно плотная. При простукивании гильзы не должно быть

глухих звуков, свидетельствующих о недостаточной монолитности гильзы или неполном прилегании ее к столбику меди. Выпеченная гильза не должна иметь продольных вмятин и складок длиной больше 100—120 *мм*. Складки по концам гильзы и складки с лопнувшими слоями, а также закусы на углах гильзы не допускаются.

При толщине гильзы свыше 3 *мм* рекомендуется накатку и выпечку ее производить в два приема: выпечь гильзу, составляющую 60—70% от требуемой толщины, а затем остальные 30—40%.

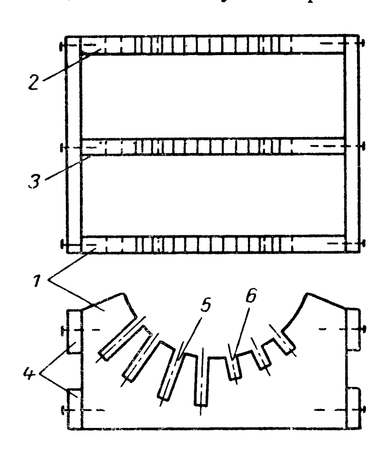


Рис. 6-12. Макет статора.

1 — передняя стенка; 2 — задняя стенка; 3 — промежуточная стенка; 4 — скрепляющая планка; 5 — пазы для укладки нижних сторон катушки; 6 — пазы для укладки верхних сторон катушки.

Изолировка лобовых частей. Перед изолировкой лобовой части следует зачистить от наплывов лака ранее наложенную изоляцию уголка в месте сопряжения ее с изоляцией лобовой части и снять временный защитный слой хлопчатобумажной ленты. Укладка слоев изоляции ведется от середины плеча к петле и далее к другому плечу — до конуса на середине этого плеча. При «сухой» микаленте накладываемые слои слегка промазываются, клеящим лаком БТ-95.

Последний слой лакоткани, а также защитный верхний слой пропитанной в лаке хлопчатобумажной ленты или стеклоленты накладываются с заходом на 20—30 *мм* на гильзу. При наложении изоляции следует стремиться к максимально плотной затяжке каждого слоя, так как эта изоляция не прессуется, а неплотность ее наложения ухудшает электроизоляционные качества обмотки.

Проверка и рихтовка лобовых частей на макете. Для полной уверенности в правильности геометрических размеров лобовых частей катушек, а также для возможности устранения некоторых незначительных отклонений от требуемой формы изготовляется специальный макет,

повторяющий часть статора (рис. 6-12), в который для контроля укладываются изготовленные катушки. Положение катушек в макете имитирует их положение в пазах статора.

6-4. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОДНОСЛОЙНЫХ РАЗРЕЗНЫХ ОБМОТОК

Разрезные обмотки (рис. 6-13) применяются при закрытых и полузакрытых пазах преимущественно в электродвигателях свыше 500 *в*. Катушки заготавливаются на шаблоне. Изготовление обмотки следует начинать с пробных катушек, по одной катушечной группе каждой плоскости. К изготовлению всего комплекта можно приступать после того, как будет проверена укладка пробных катушек в пазы статора. Размеры катушек должны удовлетворять установленным изоляционным расстояниям (табл. 6-4 и рис. 6-14). В соответствии с этими размерами производится заготовка отдельных проводников.

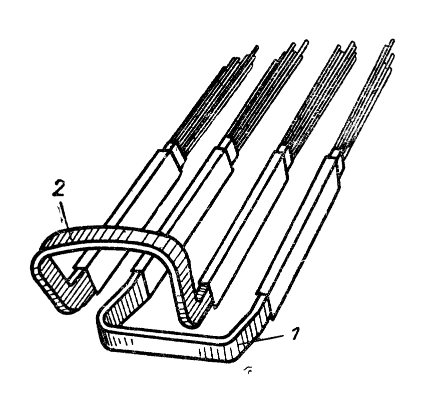


Рис. 6-13. Разрезная обмотка.
1 — с прямой головкой; *2* — с отогнутой.

Нарезанные проводники формуют на специальном макете (рис. 6-15), при этом между витками прокладывают временные прокладки из электрокартона. Их толщина равна толщине витковой изоляции, на которую они впоследствии заменяются.

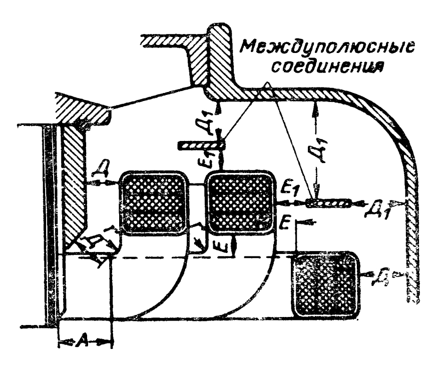


Рис. 6-14. Расположение лобовых частей однослойной обмотки.

Уложив изолированные проводники на специальный стол, собирают их в столбик. При необходимости в пазовой части укладывают дополнительные изоляционные про-

кладки между витками на клеящем лаке. После этого столбик стягивают хлопчатобумажной или стеклолентой вразбежку по всей длине. Катушки, выполненные из провода ПБД, следует просушить при температуре 100—105° С в течение 4—5 *ч*. После этого их подвергают

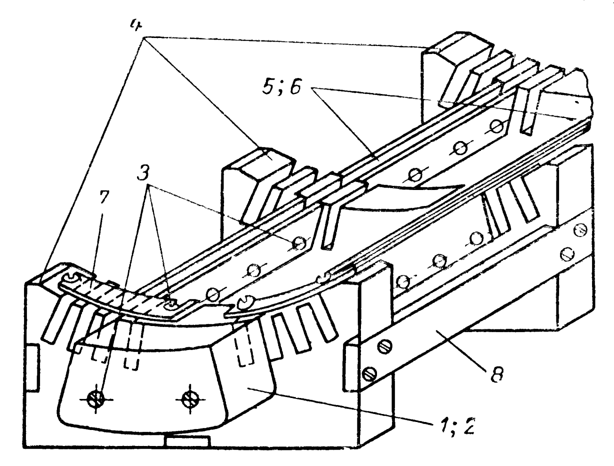


Рис. 6-15. Макет для формовки разрезной обмотки.

1 — шаблон для формовки катушки с отогнутой головкой; *2* — то же с прямой; *3* — винты и заклепки; *4* — передняя, промежуточная и задняя стенки; *5, 6* — шаблон пазовой части; *7* — запорная накладка; *8* — планка крепления.

двукратной горячей пропитке и после сушки опрессовывают. Прессовка столбиков, а также выпечка гильз производятся в пресс-формах так же, как при изготовлении двухслойных обмоток.

Таблица 6-4

Рабочее напряжение машины, *в*	Размеры, *мм*					
	А	*Д*	*Е*	$Д_1$	$Е_1$	*r*
До 500	15	15	15	5	5	10—20
До 3 150	45	30	20	5	5	10—20
До 6 300	60	40	30	10	5	10—20

Примечания: 1. Все расстояния считаются от неизолированной меди обмоток до металлических частей корпуса машины или крышек.

2. Если при размере *А*, взятом по таблице, размер *Д* покажется меньшим, чем указано в таблице, размер *А* должен быть соответственно увеличен.

Расчет размеров шаблонов для формовки лобовых частей.

а) Шаблон (рис. 6-15, деталь *1*) для формовки лобовых частей с отгибом на 90° (катушка *2*, рис. 6-13).

Длина шаблона

$$L_{ш1} = 2R_{ст}\sin\frac{\alpha_0}{2};$$

$R_{ст}$ — радиус расточки статора;

$$\alpha_0 = \frac{2q+1}{z}\cdot 360°.$$

Длина шаблона

$$L_{ш2} = 2R_{ш1}\sin\frac{\alpha_0}{2},$$

где $R_{ш1}=R_{ст}+h_{п}+E$; $R_{ш1}$ — радиус шаблона, равный радиусу лобовой части 1-й катушки; $h_{п}$ — полная высота паза статора; E — величина, взятая по табл. 6-4.

Высота шаблона

$$H_{ш} = R_{ш} - R_{ст} + \left(1-\cos\frac{\alpha_0}{2}\right)R_{ст}.$$

Ширина шаблона

$$A_{ш} = qb_{п}.$$

б) Шаблон (рис. 6-15, деталь 2) для формовки прямых лобовых частей (катушка 1, рис. 6-13).

Длина шаблона

$$L_{ш.п1} = 2R_1\sin\frac{\alpha_0}{2},$$

где $R_1=R_{ст}+\Delta_{к}+\Delta_{из}$; R_1 — радиус первой секции; $\Delta_{к}$ — толщина клина; $\Delta_{из}$ — толщина изоляции в лобовой части.

Длина шаблона

$$L_{ш.п2} = 2R_2\sin\frac{\alpha_0}{2},$$

где

$$R_2 = R_1 + h_{п} - \Delta_{из}.$$

Высота шаблона

$$H_{ш.п} = R_{ш2} - R_1 + \left(1-\cos\frac{\alpha_0}{2}\right)R_1.$$

Ширина шаблона

$$A_{ш.п} = l_2 q b_{п};$$

$l_2 = r + 10$; r берется по табл. 6-4.

6-5. ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА ФАЗНЫХ РОТОРОВ

Обмотки фазных роторов, как правило, выполняются стержневыми, и их ремонт сводится к переизолировке стержней. Задача сводится к тому, чтобы демонтировать старые стержни, переизолировать их и уложить обратно в пазы. Перед демонтажем обмотки следует произвести разметку выводных концов, а также заэскизировать

формовку лобовых частей и расположение бандажей. Шины (стержни) ротора имеют различную длину лобовых частей, стержни, расположенные в верхнем слое, длиннее стержней нижнего слоя. Кроме того, в каждом слое имеются стержни с различной длиной лобовых частей, так как в волновых обмотках, кроме основных, имеются удлиненные или укороченные соединения. Поэтому при ремонте ротора надо строго следить за тем, чтобы стержни после переизолировки были уложены обратно в те же пазы и слои, откуда они были демонтированы.

Демонтаж стержней. Перед выемкой стержней следует снять бандажи и распаять соединительные хомутики. После этого разгибают лобовые части со стороны контактных колец и срезают с выпрямленной части стержней изоляцию.

Выемку стержней производят со стороны привода, при этом размечают стержни с указанием номера паза и слоя. Пазы ротора также соответственно размечаются. С демонтированных стержней удаляют изоляцию, про-

Таблица 6-5

Часть обмотки	Наименование материала	Толщина изоляционного материала, *мм*	Односторонняя толщина изоляции, *мм*	
			$U_к < 300$ *в*	301—625 *в*
Гильзовая изоляция — нормальное исполнение				
Пазовая часть	Бумага телефонная лакированная	0,05	0,40	0,75
Лобовая часть	Лакоткань	0,20	—	0,40
	Лента миткалевая	0,18	0,36	0,36
Гильзовая изоляция — усиленное исполнение				
Пазовая часть	Синтобумага	0,15	0,60	0,75
	Бумага телефонная	0,05	0,30	0,35
Лобовая часть	Синтолента	0,11	0,44	0,44
	Лента тафтяная	0,2	0,40	0,40

изводят отжиг. Отжигают только ту часть стержней, которая при демонтаже подвергалась разгибу. После отжига производят рихтовку и лужение концов.

Изолировка роторных стержней. Роторные стержни, также как и обмотки статоров, могут выполняться с гильзовой и непрерывной (но не компаундированной) изоляцией.

Таблица 6-6

Часть обмотки	Наименование материала	Толщина изоляционного материала, *мм*	Односторонняя толщина изоляции стержня, *мм*, при $U_к$				
			до 300 *в*	301—525 *в*	526—750 *в*	751—1 000 *в*	1 001 *в* и выше
Пазовая часть	Микафолий	0,15—0,20 0,25—0,30	0,45	0,6	0,75	0,90	1,2
	Бумага телефонная лакированная	0,05	0,25	0,25	0,25	0—25	0—30
Лобовая часть	Микалента	0,13	0,26	0,26	0,52	0—52	0—52
	Лента миткалевая	0,18	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
	Лента тафтяная	0,20	—	—	—	—	0,40

В зависимости от напряжения на контактных кольцах и среды, в которой работает электродвигатель, применяется тот или иной изоляционный материал. Для роторных стержней при $U_к<300$ *в* применяется изоляция из лакоткани, миткалевой ленты и телефонной бумаги, а усиленная изоляция — из синтоленты и тафтяной ленты. Пазовую часть стержня изолируют синтофолием толщиной 0,18 *мм* при общей толщине изоляции 1,4 *мм*.

На стержни, предварительно покрытые клеящим лаком, накатывается синтофолий. Под край последнего оборота подкладывают лакированную телефонную бумагу. Горячая опрессовка может быть произведена в ручном или гидравлическом прессе при 120—130° С или на обкаточном станке при температуре 200—230° С с последующей холодной опрессовкой. Конструкция исполнения изоляции по классам А и В дана в табл. 6-5 и 6-6.

Укладка роторных стержней. Перед укладкой следует восстановить изоляцию обмоткодержателей и произвести проверку состояния стенок пазов. Укладку начи-

нают с переходных стержней, укладываются все стержни нижней плоскости и накладывается временный бандаж. Далее загибают лобовые части по шагу и приступают к укладке стержней второй плоскости.

Всю уложенную обмотку следует испытать повышенным напряжением. Если изоляция выдержала испытание, загибают стержни второй плоскости по шагу, накладывают временные бандажи и после этого пропаивают петушки. Для увеличения надежности соединений стержней и хомутов в последнее время на некоторых машинах используются твердые припои.

Наложение проволочных бандажей является одной из самых ответственных операций. Нередки случаи, когда по причине некачественного наложения бандажей выходят из строя не только ротор, но и статор. Каждый бандаж при ремонте ротора должен быть вновь пересчитан. Проволочный бандаж при расчете рассматривается как свободно вращающееся кольцо, равномерно нагруженное по всей окружности центробежными силами, зависящими от веса лобовых частей, изоляции и веса самого бандажа.

Общий ход расчета следующий. Определяют вес той части обмотки, которую должен удерживать бандаж с учетом веса всей изоляции. Далее задаются диаметром проволоки согласно табл. 6-7 (чем больше диаметр ротора, тем больше берется диаметр бандажной проволоки).

Таблица 6-7

Диаметр проволоки, *мм*	Рекомендуемое натяжение, *кгс*
0,8	40—50
1,0	50—60
1,2	65—80
1,5	100—120
2,0	180—200
2,5	Более 200

После этого определяют напряжение в бандаже от центробежных сил собственного веса:

$$\sigma_1 = kD_б^2 \left(\frac{n_1}{1\,000}\right)^2, \; кг/см^2 \qquad (6\text{-}10)$$

где $D_б$ — диаметр банджа, *см*; n_1 — угонная скорость вращения, равная $1{,}2n_{ном}$, *об/мин*; k — постоянный коэффициент, для стальной проволоки равен 0,022, для бронзовой 0,024.

Число витков бандажа $w_б$ определяется по следующей формуле:

$$w_б = 1{,}13 \frac{GD_2}{d^2 (R_z - \sigma_1)} \left(\frac{n_1}{1\,000}\right)^2, \qquad (6\text{-}11)$$

где G — вес обмотки с изоляцией, *кг*; D_2 — средний диаметр обмотки, *см*; d — диаметр проволоки бандажа, *мм*; R_z — допустимое напряжение в бандаже, для стальной проволоки 3 000—3 500 *кгс/см²*, для бронзовой 1 800—2 000 *кгс/см²*.

При больших окружных скоростях машины число витков бандажа получается очень большим, и уложить

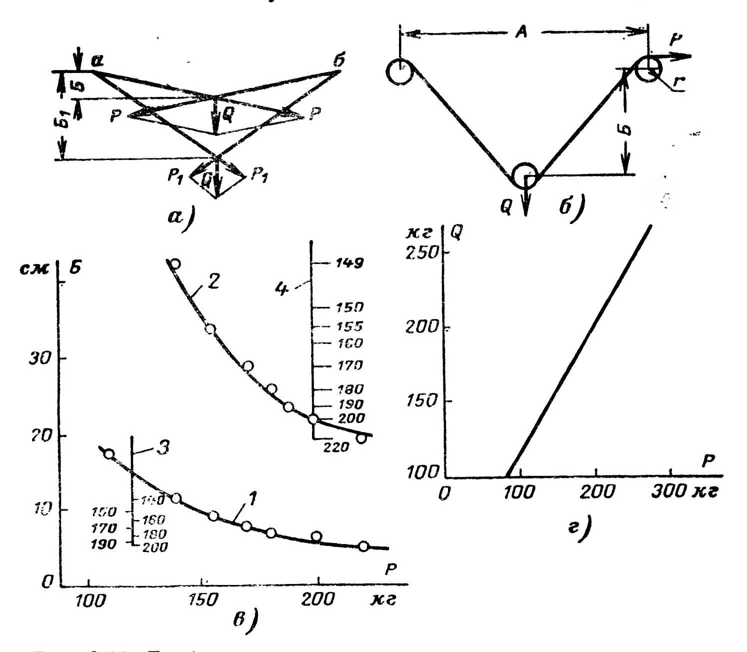


Рис. 6-16. Графики натягов.

а — диаграмма сил; *б* — расположение натяжных блоков; *в* — график натягов в зависимости от стрелы провеса; *1* — $Q=100$ *кг*; *2* — $Q=200$ *кг*; *3*, *4* — шкалы натягов; *г* — график натягов в зависимости от величины тарированного груза при постоянной стреле провеса.

их на заданный участок лобовых частей невозможно. В этом случае витки укладываются в два и большее число слоев. Бандажи накладываются на специальных бандажировочных станках. Однако в практике ремонта в большинстве случаев наложение бандажей производят вручную. При этом следует обеспечить правильную величину натяга. Величину натяга можно регулировать изменением стрелы провеса и величиной груза.

Если бандажную проволоку некоторой длины закрепить в точках *а* и *б* (рис. 6-16,*а*) и в середине подвесить

груз Q, то возникающее усилие в проволоке P (натяг) будет зависеть от веса Q и стрелы провеса $Б$, здесь имеют место два случая:

1) вес тарированного груза — величина постоянная и натяг P меняется за счет изменения стрелы провеса;

2) стрела провеса — величина постоянная, а натяг регулируется за счет изменения веса тарированного груза. Из рис. 6-16,*а* видно, что чем больше стрела провеса при Q, равном постоянной величине, тем меньше величина натяга, и наоборот.

Величина натяга меняется в широких пределах при любом значении тарированного груза Q. Однако тарированный груз должен быть выбран такой величины, которая обеспечивает требуемый натяг с наименьшей погрешностью, т. е. на той части шкалы натягов, которая более близка к прямолинейной. Сказанное разберем на примере.

Определим величину стрелы провеса (шкалу натягов), обеспечивающую натяг от 150 до 200 *кгс* при тарированном грузе 100 и 200 *кг*. Величина стрелы провеса в зависимости от натяга

$$Б = \frac{AQ - 8Pr}{2\sqrt{4P^2 - Q^2}},\ см, \qquad (6\text{-}12)$$

где Q — величина тарированного груза, *кг*; A — расстояние между центрами роликов, *см*; r — радиус ролика, *см* (рис. 6-16,*б*); P — натяг, *кг*.

В табл. 6-8 даны значения натяга в зависимости от стрелы провеса при Q, равном 100 и 200 *кг*, определенные по формуле (6-12). На основании этих данных на рис. 6-16,*в* даны графики зависимости величины натяга P от величины тарированного груза Q.

Таблица 6-8

A, *см*	*P*, *кг*	*Б*, *см*	
		Q=100 *кг*	Q=200 *кг*
105	110	17,8	95
105	140	11,5	42
105	155	9,4	33,5
105	160	8,9	31,7
105	170	7,8	28,3
105	180	6,75	25,7
105	190	6,0	23,2
105	200	5,6	21,6
105	220	4,35	18,5

Из шкалы натягов при Q, равном 100 *кг* (рис. 6-16,*в*), видно, что отклонение стрелы провеса от величины 5,6 *см* (соответствует натягу 200 *кгс*) на 1 *см* приводит к изменению натяга на 20 *кгс*.

При грузе, равном 200 *кг*, отклонение стрелы провеса от величины 21,6 *см* (соответствует натягу 200 *кгс*)

на 1 *см* приводит к изменению натяга на 2—3 *кгс*, что вполне допустимо. Следовательно, в этом случае нужно брать груз весом 200 *кг*.

Зависимость натяга от величины тарированного груза при Б постоянном. Величина тарированного груза Q, обеспечивающего необходимый натяг при постоянном значении стрелы провеса $Б$, определяется по формуле

$$Q = \frac{8APr - 4PБ\sqrt{A^2 - 16r^2 + 4Б^2}}{A^2 + 4Б^2}. \qquad (6\text{-}13)$$

В табл. 6-9 даны значения величины натягов P в зависимости от груза Q при постоянной величине стрелы провеса $Б$, равной 40 *см*, вычисленные по формуле (6-13). На основании этих данных на рис. 6-16,*г* дан график натягов в зависимости от величины тарированного груза. Из рисунка видно, что этот способ дает более точные результаты, так как шкала натягов получается прямолинейной. Вместо груза здесь очень удобно применять динамометр.

Таблица 6-9

А, см	*Р, кг*	*Б, см*	*Q, кг*
105	100	40	139
105	140	40	195
105	150	40	208,5
105	155	40	215,5
105	160	40	222,5
105	170	40	237
105	180	40	250
105	190	40	268
105	200	40	278

Существуют следующие способы намотки бандажей.

С помощью натяжной рамы и тарированного груза. Этот способ применяется при намотке многослойных бандажей (от трех слоев и более), особенно при намотке проволочных бандажей турбинных роторов АЕГ старых выпусков, где число слоев достигает 10 и более. Расчет стрел провеса, обеспечивающих соответствующие натяги, дан в табл. 6-8.

Устройство для намотки бандажей представлено на рис. 6-17. Установка состоит из барабана *5*, вращающегося в подшипниках *4*, установленных на опорных стойках *3*. Барабан снабжен ленточным тормозом *2*, крепящемся с помощью штыря *1*, регулируемым передвижением груза *7* по рычагу *6*. Бандажная проволока, намотанная ровными рядами на барабан с натягом 80—100 *кгс*, проходит через ролики *9* и защитную стойку *11* и закрепляется на лобовой части ротора *13*. Вся установка крепится на деревянной раме *12*. Натяг контро-

лируется динамометром или тарированным грузом *10*, подвешенным на натяжной раме *8*.

При намотке бандажей ротор вращается с помощью червячного редуктора со скоростью 4—6 *об/мин*.

С помощью петли и тарированного груза. Для намотки несложных однослойных и двухслойных банда-

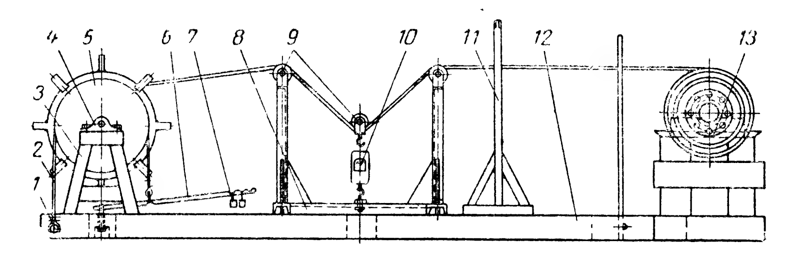


Рис. 6-17. Установка для намотки бандажей с помощью натяжной рамы.

жей наибольшее распространение получил метод петли и тарированного груза. Это приспособление показано на рис. 6-18.

По этому методу один конец бандажной проволоки закрепляется в точке *А* на бочке ротора *2*. После этого на бочку ротора или на лобовую часть наматывают расчетное количество витков, одевают блок *3* и закреп-

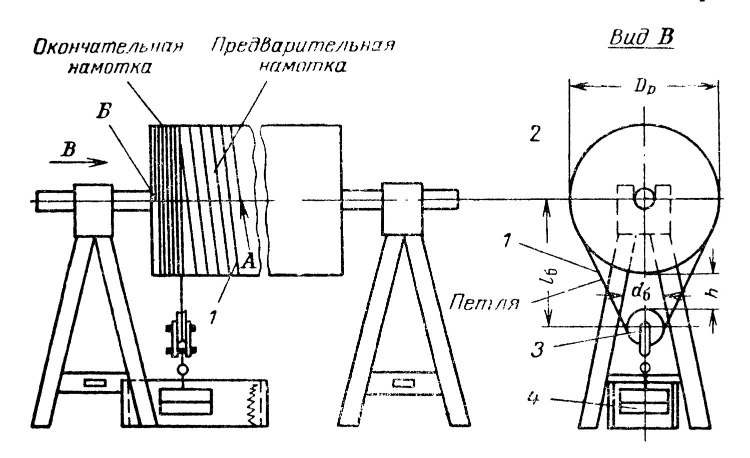


Рис. 6-18. Приспособление для намотки бандажей с помощью петли и тарированного груза.

ляют второй конец в точке *Б*, образуя петлю *1*. К блоку подвешивают груз *4*. Вращая ротор и перекатывая бандажную проволоку, можно намотать бандаж. Вес груза для создания соответствующего натяга определяется по формуле

$$Q = P\sqrt{4 - \left(\frac{D_р - d_б}{l_б}\right)^2}, \ кг, \qquad (6\text{-}14)$$

где $D_р$ — диаметр ротора, *см*; $d_б$ — диаметр блока, *см*; $l_б$ — расстояние между осями ротора и блока, *см*.

Имеются три способа расположения тарированного груза:

1) петля и блок расположены под ротором (под ротором должен быть приямок);

2) петля и блок расположены над ротором. При этом способе требуются два дополнительных блока и трос;

3) петля и блок расположены сбоку ротора. При этом способе необходимо повысить устойчивость ротора.

Расстояние между центрами ротора и блока определяется из формулы

$$l_б = h + \frac{D_р + d_б}{2}, \ см, \qquad (6\text{-}15)$$

где h — расстояние между наружными диаметрами ротора и блока, *см*.

Бандаж накладывается на лобовые части в местах, где обмотка опирается на обмоткодержатели или нажимную шайбу.

По мере намотки витки подбивают к ранее намотанным фибровой подбойкой и молотком. Через каждые 70—90 *мм* под проволоку кладут полоски жести толщиной 0,3—0,5 *мм* и шириной 10 *мм*. Длину полосок берут больше ширины бандажа, чтобы их можно было загнуть и пропаять. Кроме этих полосок, кладут две замочные для укрепления концов бандажа (рис. 6-19).

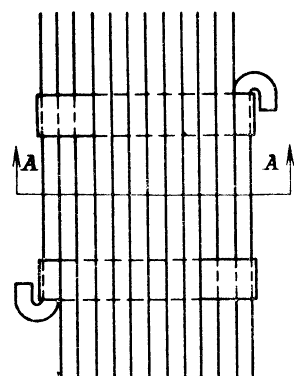


Рис. 6-19. Заделка концов бандажа.

Лобовые части изолируют от бандажа. Конструкция подбандажной изоляции зависит от напряжения на коль-

цах. Пайку бандажей производят в процессе и после их намотки равномерным тонким слоем припоя. По всей поверхности бандажа после пайки не должно быть наплывов.

Бандажи считаются доброкачественными, если они удовлетворяют следующим требованиям:

1) При легком постукивании молотком бандаж не издает дребезжащего звука.

2) Концы замков плотно подбиты и хорошо пропаяны.

3) Крайние витки плотно уложены и хорошо пропаяны. Конец проволоки верхнего слоя заделан в петлю.

4) Нет провала витков верхнего слоя между витками нижнего слоя.

5) Бандаж должен иметь цилиндрическую форму. Допускаются отклонения: а) элептичность не более 5 *мм;* б) конусность не более 3 *мм* в сторону от хомутиков к бочке ротора.

6) Бандаж должен быть ниже железа бочки ротора не менее 0,5 *мм.*

6-6. РЕМОНТ КОРОТКОЗАМКНУТЫХ РОТОРОВ

Наиболее характерные и часто встречающиеся повреждения короткозамкнутых роторов можно разделить на две категории:

а) Повреждения, приводящие к нарушению нормальной работы двигателя или к аварийному выходу его из строя. Сюда относятся:

1) Обрыв стержней в пазовой части или на выступающем конце. Обрыв выступающего конца стержня может привести к повреждению обмотки статора.

2) Распайка соединений стержней с короткозамыкающими кольцами, вызванная некачественной пайкой.

3) Разрывы короткозамыкающих колец под действием динамических напряжений от центробежных сил или в результате механических перенапряжений, возникающих от температурных факторов.

б) Повреждения, которые еще не привели к обрыву короткозамкнутой обмотки. Эти повреждения практически не нарушают нормальной работы двигателя и поэтому в процессе эксплуатации двигателя ничем себя не обнаруживают (рис. 6-20). Сюда относятся:

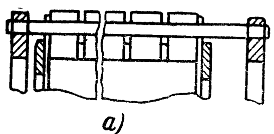
1) Смещение беличьей клетки. Короткозамыкающие

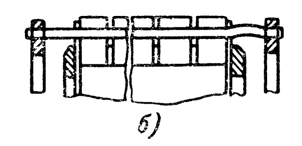
кольца с обеих сторон ротора находятся на разных расстояниях от активной стали.

2) Горбообразный прогиб концов стержней, выступающих из активной стали беличьей клетки.

3) Изгиб концов стержней в направлении вращения ротора от усилия скручивания короткозамыкающим кольцом. Это явление может иметь место в роторах с большими окружными скоростями и массивными короткозамыкающими кольцами.

4) Наличие трещин в стержнях, цветов побежалости на короткозамыкающих кольцах в местах паяных соединений со стержнями, подгары в этих местах.





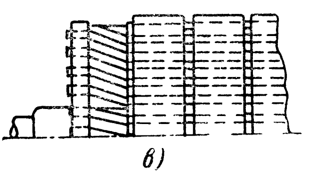


Рис. 6-20. Виды повреждений беличьих клеток.

а — смещение беличьей клетки; *б* — горбообразный прогиб стержней; *в* — изгиб концов стержней.

По требованиям, предъявляемым к прочности элементов беличьих клеток и соединений стержней с короткозамыкающими кольцами, короткозамкнутые обмотки роторов делятся на две категории:

1) Соединения, выполняемые для двигателей с окружной скоростью 50 *м/сек* и выше.

2) Соединения, выполняемые для двигателей с окружной скоростью ниже 50 *м/сек*. В качестве конструктивных мер, способствующих повышению прочности короткозамкнутых обмоток I категории, применяют:

а) цельные короткозамыкающие кольца, изготовленные из литых прокованных заготовок;

б) увеличение сечения короткозамыкающих колец и площади контакта соединения стержня с кольцом;

в) специальные припои, главным образом марки ПСР-45.

Для обмоток второй категории допускается применение сварных короткозамыкающих колец с одним или несколькими стыками и применение менее качественного припоя ПМФ-7.

Существуют следующие виды ремонта беличьих клеток:

1. Полная замена всей обмотки.

2. Замена лопнувших стержней и замыкающих колец.

3. Пайка дефектных мест соединения стержней с замыкающим кольцом.

В первых двух случаях приходится изготавливать стержни и замыкающие кольца. Материалом для рабочей клетки (для стержней и колец) служит медь марок М-1 и М-2. Для стержней пусковой клетки чаще всего применяют латунь марок Л-62; ЛС59-1 и ЛМц-58-2. Кольца пусковой и рабочей клетки для большинства конструкций изготавливают из меди, но для отдельных типов двигателей, кроме перечисленных материалов, применяют различные бронзы и даже сталь.

Короткозамыкающие кольца первой категории изготавливаются из прокованных цельных заготовок, и только кольца с диаметром 800 *мм* и толщиной до 20 *мм* допускается изготавливать (после проведения соответствующего расчета на прочность) сварными с одним или двумя стыками. Соединения частей короткозамыкающего кольца производятся газовой сваркой.

Непосредственно перед сваркой заготовки колец и присадочные прутки обезжиривают и протравливают. После сварки медные кольца проковывают при температуре не ниже 650° С и охлаждают водой. Латунные кольца проковывают при температуре не выше 500° С.

После проковки отжигают сварные швы, нагревая кольца до 550—600° С, и охлаждают. Медные кольца охлаждают водой, а латунные при комнатной температуре. Стержни изготавливаются в соответствии с фирменным исполнением, за исключением бутылочного и трапециевидного профиля, изготовление которых в условиях ремонтной мастерской затруднительно.

Пайка соединений роторных стержней с короткозамыкающими кольцами является наиболее ответственной операцией при ремонте. Особое значение имеет выбор припоев и флюсов.

Основные припои, применяемые при пайке медных и латунных стержней с медными или латунными кольцами, даны в табл. 6-10.

В качестве флюса почти для всех припоев используется бура, за исключением меднофосфористого при-

поя, так как он самофлюсуется при пайке медных колец с медными стержнями. Пайку производят автогенной горелкой. После общего разогрева кольца и стержней припой расплавляют касанием наиболее нагретых мест на наружной поверхности кольца. Не допускается плавание припоя на пламени.

Таблица 6-10

Припои	Марка	Температура расплавления, °С
Серебряный	ПСР-45	725; 765
Меднофосфористый	МПФ-7	710
Медноцинковый	ЛОК59-1-03; Л-62	890; 905

Ремонт беличьей клетки с использованием старых стержней и короткозамыкающих колец. Такой вид ремонта может быть выполнен при отрыве одного-двух стержней или когда принято решение заменить припой. При ремонте рабочей клетки, расположенной под пусковой, требуется демонтировать пусковую клетку для обеспечения доступа к рабочей. Стержни распаивают автогенной горелкой. После удаления короткозамыкающих колец концы стержней очищают от наплывов и вынимают их. Стержни выбивают очень осторожно ударами молотка по концам через деревянные или алюминиевые подбойки.

Допускается оборванные стержни восстанавливать пайкой серебряным припоем ПСР-45 и ПСР-70. Стержни с трещинами не следует ремонтировать заплавлением припоем. Их рекомендуется распиливать по месту трещины, обработать концы под пайку и спаять заново. Стержни вставляют одновременно во все пазы на длину пакета с постепенной подбойкой диаметрально расположенных стержней. При поочередной укладке их по окружности могут произойти сдвиг активной стали и уменьшение размеров последних пазов.

Ремонт беличьих клеток из алюминиевого сплава. В роторах с алюминиевыми беличьими клетками наряду с разрывами и трещинами в стержнях и замыкающих кольцах наблюдаются усадочные раковины, вызванные некачественной заливкой. При наличии в одном кольце не более двух-трех неглубоких трещин для их заделки допускается пайка припоем из 67% алюминия, 21%

олова и 12% меди. Температура плавления около 380° С. До начала пайки поврежденные участки должны быть аккуратно разделаны, тщательно очищены от грязи и прогреты паяльной лампой до 400—450° С.

Пайка производится прикосновением палочки припоя к поврежденному месту. При большом количестве трещин, а также при обрыве стержней или наличии раковин ротор требуется полностью перезалить.

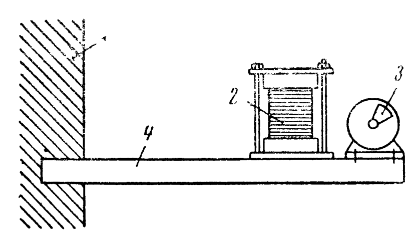


Рис. 6-21. Вибрационная установка для заливки роторов.

1 — стена; *2* — ротор; *3* — двигатель с дисбалансом; *4* — плита.

Для этого старая алюминиевая клетка выплавляется при 700—750° С. Для заливки роторов применяют алюминиево-марганцовистый сплав с содержанием марганца до 2—3%. В ремонтных мастерских, где отсутствуют специальные установки для центробежной заливки или литья под давлением, лучше всего пользоваться вибрационным методом заливки. По этому методу ротору сообщаются колебания в вертикальном направлении, которые вызывают появление сил инерции в жидком алюминии, повышающих внутреннее давление. Это способствует хорошему заполнению пазов.

На рис. 6-21 схематически показано простейшее вибрационное устройство, состоящее из опорной плиты в виде консольной балки с вылетом, равным 0,8 *м*. На свободный конец балки устанавливают электродвигатель мощностью 0,25—0,5 *квт* со скоростью вращения 1 000—1 500 *об/мин*, на конце вала крепится дисбаланс. При вращении электродвигателя дисбаланс передает возмущающую силу на плиту, в результате чего плита начинает вибрировать.

6-7. МЕХАНИЧЕСКИЙ РЕМОНТ

Разборка электродвигателей. Разборку начинают со снятия полумуфты или шкива, затем снимают крышки масленок, фланцы, крепящие шарикоподшипники, отворачивают скобки, крепящие провода. После этого снимают подшипниковые щиты и выводят ротор.

Подшипники скольжения. Наиболее часто встречающийся вид ремонта подшипников скольжения — это перезаливка вкладышей или втулок. Старую заливку (баббит) выплавляют. Внутреннюю поверхность вкладышей (втулок) вылуживают и вновь заливают баббитом. Для электродвигателей применяют баббит марки Б-16. После остывания вкладыши внутри протачивают на токарном станке с припуском на пришабровку по шейке вала. Конусность и овальность для шеек вала не должна превышать 0,05 *мм.*

Таблица 6-11

Внутренний диаметр подшипника, *мм*	Радиальные зазоры, *мм*		
	В новых подшипниках		Максимально допустимые при износе подшипников
	Шариковые	Роликовые	
20—30	0,01—0,02	0,03—0,05	0,1
35—50	0,01—0,02	0,05—0,07	0,2
55—80	0,01—0,02	0,06—0,08	0,2
85—120	0,02—0,03	0,08—0,10	0,3
130—150	0,02—0,04	0,10—0,12	0,3

Подшипники качения. У подшипников качения чаще всего срабатываются обоймы в местах касания с телами качения (шарики, ролики).

Если зазор, замеренный щупом, выше допустимого, то его необходимо менять (табл. 6-11).

В некоторых случаях наблюдается ослабление посадочных мест подшипников на валу и в подшипниковом щите. Такие дефекты нельзя ликвидировать накерниванием. Необходимо произвести наварку шейки вала и проточить его по размеру подшипника на токарном станке. При ослаблении посадочного места в подшипниковом щите следует подобрать подшипник равной грузоподъемности с меньшим наружным диаметром, что дает возможность применить наружную втулку с диаметром, обеспечивающим плотную посадку в подшипниковом щите. Основными способами, обеспечивающими необходимую плотность посадки, являются металлизация и хромирование шеек вала после проточки и шлифования.

Ремонт активной стали. 1. Активная сталь должна быть опрессована так плотно, чтобы сила трения между отдельными местами исключала возможность какого-

либо перемещения. Проверка плотности прессовки производится контрольным ножом. Особенно тщательно следует проверять плотность крайних пакетов. Опрессовку следует считать слабой, если лезвие ножа проходит от усилия руки между листами стали на глубину 3—4 *мм*. Плотность крепления нажимных пальцев проверяется легкими ударами молотка по ним через подбойку. Если нажимный палец смещается, то его надо закреплять. В зависимости от степени ослабления активной стали выбирают метод ее закрепления. Если активная сталь ослаблена только в небольшом числе отдельных пакетов, то уплотнение их производят забивкой распорных текстолитовых клиньев (рис. 6-22). Ослабевшие нажимные пальцы закрепляют стальными штифтами или электросваркой. При большом количестве ослабевших пакетов подпрессовку можно произвести подтяжкой нажимных шайб, прессующих сталь (рис. 6-23). Сжатие стали производится давлением на нее в 10—12 *кг/см²*. Для предотвращения смещения зубцов в пазы закладывают оправки по форме паза в количестве 6—8 шт. по окружности статора и для листов, составленных из отдельных сегментов, не менее 2 шт. на каждый сегмент.

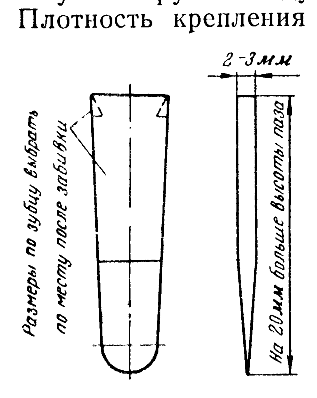


Рис. 6-22. Уплотняющий клин.

2. *Оплавление отдельных участков стали.* На рис. 6-24 схематически показано оплавленное место, где в видимой зоне листы оплавлены между собой, а повреждение межлистовой изоляции лежит на 10—15 *мм* ниже видимой зоны оплавления. Во время ремонта вся поврежденная зона должна быть вырублена. Для удаления заусениц между листами поверхность вырубленной зоны обрабатывается острым шабером, после чего листы стали раздвигаются отверткой и между ними на глубину 10—15 *мм* закладываются пластинки из слюды толщиной 0,05—0,07 *мм*. Отремонтированный участок покрывается покровным лаком БТ-99. Если поврежденный участок находится в пазу, то для предупреждения вспучивания обмотки вырубленное место заполняется специальной замазкой. Если зона повреждения значительна, иногда

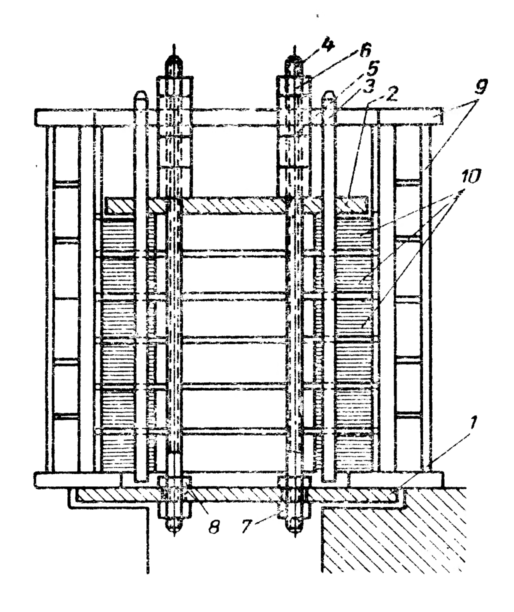


Рис. 6-23. Приспособление для опрессовки активной стали.

1 — нижняя нажимная плита; *2* — верхняя нажимная плита, *3* — линейка пазовая; *4* — шпилька прессующая; *5* — шайба; *6* — прессгайка; *7* — гайка; *8* — контргайка; *9* — корпус статора; *10* — пакеты активной стали.

приходится обрубать целиком зубец на длину одного-двух пакетов. В этом случае вырубленные зубцы должны быть заменены заполнителем из текстолита.

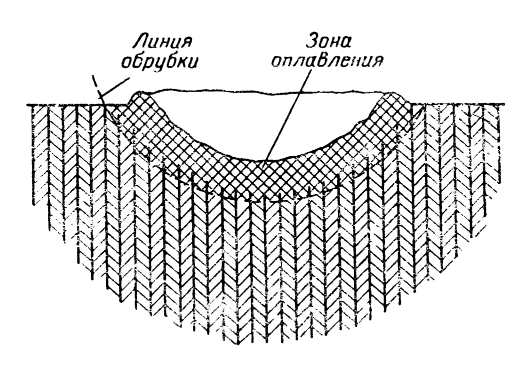


Рис. 6-24. Оплавление активной стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабенко Д. А. и др., В помощь электрику — обмотчику трехфазных электродвигателей, Госэнергоиздат, 1962

2. Виноградов Н. В., Производство электрических машин, Госэнергоиздаг, 1961.

3. Винников И. М., Условие выполнимости несимметричных петлевых обмоток и группировка катушечно-фазных групп. Электротехническая промышленность. Научно-технический сборник, № 3, 1963, стр. 57—61.

4. Винников И. М., Графический метод определения оптимальных обмоточных данных асинхронных двигателей. Электротехническая промышленность. Информационный научно-технический сборник, № 243, 1964, стр. 37—42.

5. Винников И. М., Упрощенный расчет обмоточных данных электродвигателей при ремонте. Электротехническая промышленность. Информационный научно-технический сборник, № 247, 1964.

6. Винников И. М., Маршак Е. Л., Пайка соединений обмоток гидрогенераторов припоем ПСР-15. Сборник рационализаторских предложений 149, 1964.

7. Винников И. М., Методы уплотнения активной стали при ремонте электродвигателей. Сборник рационализаторских предложений 163, ВНИИЭМ, Москва, 1965.

8. Жерве Г. К., Расчет асинхронного электродвигателя при перемотке, Госэнергоиздат, 1956.

9. Зимин В. И. и др., Обмотки электрических машин, Госэнергоиздат, 1961.

10. Калитвянский В. И., Изоляция электрических машин, Госэнергоиздат, 1949.

11. Коварский Е. М., Ремонт электрических машин, Госэнергоиздат, 1960.

12. Кучера Я. и др., Обмотки электрических вращательных машин, Изд-во Чехословацкой Академии наук, Прага, 1963.

13. Лившиц-Гарик М., Обмотки машин переменного тока, Госэнергоиздат, 1958.

14. Маршак Е. Л., Ремонт обмоток статоров электрических машин переменного тока, изд-во «Энергия», 1966.

15. Рубо Л. Г., Пересчет и ремонт асинхронных двигателей мощностью до 100 *квт*, Госэнергоиздат, 1961.

16. Слоним Н. И., Аскинази А. И., Организация и технология ремонта электрических машин, серия «Электроэнергетика», вып. 2, Московский Дом научно-технической пропаганды имени Ф. Э. Дзержинского, Москва, 1959.

17. Уманцев Р. Б., Конструкция и ремонт короткозамкнутых обмоток роторов крупных двигателей, изд-во «Энергия», 1967.

18. Маршак Е. Л., Уманцев Р. Б., Схемы обмоток статоров, изд-во «Энергия», 1967.

СОДЕРЖАНИЕ